



Otimização energética da máquina de impregnar telas para pneus

SUSANA PATRICIA FERREIRA OLIVEIRA

Novembro de 2015

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

Mestrado em Engenharia Química - Otimização na Indústria Química

Dissertação de mestrado

2ºano – 2ºsemestre

Otimização energética da máquina de impregnar telas para pneus



Aluna:

Susana Oliveira

Orientadora do ISEP:

Engª Paula Neto

Co-orientadora do ISEP:

Engª Anabela Guedes

Orientador(a) da empresa:

Engº Pedro Serrano

Data da entrega: 27 de outubro de 2015

Agradecimentos

Quero agradecer a todas as pessoas que me ajudaram de alguma forma durante este trabalho.

Agradeço à Eng.^a Paula Neto e à Eng.^a Anabela Guedes o acompanhamento do trabalho, o esclarecimento das dúvidas e toda a disponibilidade dispensada.

Ao Eng.^o Miguel Sá pela receptividade com que me recebeu e por todos os esclarecimentos efetuados na empresa. Agradeço também aos colaboradores da Cofely e da C-ITA por toda a ajuda que disponibilizaram quando solicitada.

Ao Eng.^o Pedro Serrano por ter aceite a orientação de estágio e me ter orientado durante este período.

Aos estagiários da C-ITA e à minha colega de mestrado Joana Ferreira que ajudaram na minha integração e no decorrer do trabalho.

À empresa *Spirax Sarco* pela cedência dos orçamentos dos permutadores e pela rapidez na resposta.

Às minhas amigas de curso pelos momentos partilhados desta experiência e pelo companheirismo de mais uma etapa.

Termino estes agradecimentos com um agradecimento especial aos meus pais e ao meu namorado que estiveram sempre presentes. Um muito obrigado por me acompanharem em mais uma etapa importante!

Sumário

Este trabalho realizou-se na empresa *Continental – Indústria Têxtil do Ave, S.A (C-ITA)* em colaboração com a empresa *Cofely GDF Suez – Energia e Serviços Portugal, S.A.*

O principal objetivo desta dissertação foi a otimização energética da máquina de impregnar telas para pneus – a máquina ZELL, tendo em conta as principais utilidades envolvidas: eletricidade e gás natural.

Deste modo foi feito um levantamento prévio das condições de operação desta máquina relativamente às telas mais representativas da produção da empresa. Tendo-se verificado que as telas em poliéster representam 65% da produção total da máquina ZELL. Para este tipo de produto, foi feita uma análise dos consumos energéticos anuais para avaliar qual das utilidades referidas corresponde à maior parcela energética. Verificou-se que o consumo de gás natural representa a maior parcela da fatura energética anual da empresa correspondendo a 47%. Além disso, da energia total consumida anualmente pela ZELL, que corresponde a 1360 tep, 32% é relativo à energia elétrica e os restantes 68% ao consumo de gás natural.

Por fim, procedeu-se à otimização energética estudando as alterações possíveis no sentido de reduzir os consumos energéticos da máquina, sem prejuízo da qualidade do produto final. Para isso propôs-se a instalação de permutadores de fluxo cruzado para pré-aquecer quer o ar fresco quer o ar de combustão. A implementação desta medida tem um período de retorno à volta de três anos e pode levar a uma poupança anual entre 1.359.639 kWh e 2.370.114 kWh para o ar fresco e 393.523 kWh e 639.475 kWh para o ar de combustão.

Palavras-chave: telas para pneus; energia elétrica, gás natural, otimização energética.

Abstract

This work took place in the *Continental – Indústria Têxtil do Ave, S.A (C-ITA)* in collaboration with the company *Cofely GDF Suez – Energia e Serviços Portugal, S.A.*

The main objective of this work was the energy optimization of the machine to impregnate fabrics for tires - the ZELL machine, taking into account the main utilities involved: electricity and natural gas.

Thus a preliminary survey of the operating conditions of this machine on the most representative screens of the production company has been done. Having found that the polyester fabrics account for 65% of total production of ZELL machine. For this type of product, an analysis of the annual energy consumption to assess which of the utilities mentioned corresponds to higher energy portion it was made. It was found that consumption of natural gas represents the largest share of the annual energy bill of the company corresponding to 47%. In addition, the total energy consumed annually by ZELL, corresponding to 1360 toe, 32% relates to electricity and the remaining 68% the consumption of natural gas.

Finally, we proceeded to the energy optimization studying possible changes to reduce the energy consumption of the machine, without jeopardizing the quality of the final product. For this it is proposed to install cross-flow heat exchangers to pre-heat or cool air or the combustion air. The implementation of this measure has a payback period of around three years and can lead to an annual savings of between kWh 1,359,639 and kWh 2,370,114 for the fresh air and kWh 393,523 and kWh 639,475 for the combustion air.

Keywords: fabrics for tires; electricity, natural gas, energy optimization.

Nomenclatura

Símbolos

A_a	m^2	Área de amostragem da conduta
$A_{ar,1}$	m^2	Área livre de passagem do ar nas grelhas dos queimadores da estufa 1
$A_{ar,2}$	m^2	Área livre de passagem do ar nas grelhas dos queimadores da estufa 2 a 7
$A_{e,ret}$	m^2	Área externa dos retângulos da grelha do queimador
$A_{gr,1}$	m^2	Área total da grelha dos queimadores da estufa 1
$A_{i,ret}$	m^2	Área interna dos retângulos da grelha do queimador
C_p	$kJ/(kg \cdot ^\circ C)$	Capacidade calorífica
cp_t	$kJ/(kg \cdot ^\circ C)$	Capacidade calorífica da tela
E_c	kJ/kg	Energia cinética específica
E_e	kW	Energia por unidade de tempo que entra no sistema
E_p	kJ/kg	Energia potencial específica
E_s	kW	Energia por unidade de tempo que sai do sistema
H_e	kJ/kg	Entalpia específica de entrada
H_s	kJ/kg	Entalpia específica de saída
\dot{m}_f	kg/s	Caudal mássico do fluido frio no permutador de calor
$\dot{m}_{f,1}$	kg/s	Caudal mássico de ar fresco nos orifícios de entrada da tela
$\dot{m}_{f,2}$	kg/s	Caudal mássico de ar fresco nos orifícios de saída da tela
m_{final}	kg	Massa final de solução
\dot{m}_g	kg/s	Caudal mássico dos gases de combustão
$\dot{m}_{gás}$	kg/s	Caudal mássico do gás natural
$m_{início}$	kg	Massa inicial de solução
MM_g	g/mol	Massa molar dos gases de combustão em base húmida
\dot{m}_q	kg/s	Caudal mássico de ar nos queimadores
$\dot{m}_{solução}$	kg/s	Caudal mássico de solução presente na tina
\dot{m}_t	kg/s	Caudal mássico da tela
P_c	hPa	Pressão absoluta no interior da conduta
q_A	kW	Potência perdida na parte A da máquina ZELL
q_B	kW	Potência perdida na parte B da máquina ZELL
q_f	kW	Potência transferida pelo fluido frio no permutador de calor
T	$^\circ C$	Temperatura média do ar
$T_{a,e}$	$^\circ C$	Temperatura média da água de arrefecimento à entrada
$T_{a,s}$	$^\circ C$	Temperatura média da água de arrefecimento à saída
T_{fe}	$^\circ C$	Temperatura do fluido frio à entrada do permutador de calor
T_{fs}	$^\circ C$	Temperatura do fluido frio à saída do permutador de calor
T_g	K	Temperatura média dos gases de combustão
$T_{gás}$	$^\circ C$	Temperatura do gás natural

T_p	°C	Temperatura média do ar nos pisos
T_q	°C	Temperatura média do ar nos queimadores
T_t	°C	Temperatura da tela
$V_{\text{água}}$	m ³ /min	Caudal volumétrico de água de arrefecimento
$\dot{V}_{f,1}$	m ³ /s	Caudal volumétrico de ar fresco nos orifícios de entrada da tela
$\dot{V}_{f,2}$	m ³ /s	Caudal volumétrico de ar fresco nos orifícios de saída da tela
v_g	m/s	Velocidade de escoamento dos gases de combustão
V_g	m ³ /min	Caudal volumétrico médio de gás natural
v_q	m/s	Velocidade média de ar nos queimadores
\dot{V}_q	m ³ /min	Caudal volumétrico de ar dos queimadores
v_t	m/s	Velocidade da tela

Gregas

ρ_g	kg/m ³	Massa volúmica dos gases de combustão
$\Delta H_{\text{reação}}^0$	kW	Calor da reação de combustão

Siglas

C-ITA	Continental - Indústria Têxtil do Ave, S.A
ITA	Indústria Têxtil do Ave, S.A
SGCIE	Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia

Índice

1. Introdução	- 1 -
1.1. Apresentação da empresa	- 1 -
1.1.1. Continental – Indústria Têxtil do Ave, S.A	- 1 -
1.1.2. Cofely GDF Suez – Energia e Serviços Portugal, S.A.....	- 3 -
1.2. Processo de fabrico das telas	- 3 -
1.3. Objetivo do trabalho	- 4 -
1.4. Organização do trabalho de dissertação.....	- 5 -
2. A máquina ZELL.....	- 7 -
2.1. Constituintes da máquina ZELL	- 7 -
2.2. Funcionamento da máquina ZELL	- 10 -
2.3. Utilidades da máquina ZELL	- 13 -
3. Levantamento energético	- 15 -
3.1. Produção anual da ZELL	- 15 -
3.2. Consumo energético	- 15 -
3.3. Consumo específico	- 17 -
3.4. Dados experimentais	- 17 -
3.4.1. Temperaturas de operação nas estufas	- 17 -
3.4.2. Composição e volume de gás natural	- 18 -
3.4.3. Velocidade média e caudal mássico do ar nas grelhas dos queimadores	- 19 -
3.4.4. Temperatura do ar exterior nos pisos da ZELL.....	- 22 -
3.4.5. Caudais mássicos do ar fresco.....	- 22 -
3.4.6. Características da tela.....	- 23 -
3.4.7. Temperaturas e consumos de água	- 23 -
3.4.8. Caudal mássico dos gases de combustão	- 24 -
3.4.9. Características da solução de ativação	- 25 -
3.4.10. Características da solução de impregnação	- 26 -
4. Análise energética	- 27 -
4.1. Avaliação energética - Parte A	- 29 -
4.1.1. Determinação da potência correspondente às correntes de saída.....	- 29 -
4.1.2. Determinação da potência correspondente às correntes de entrada.....	- 32 -
4.2. Avaliação energética - Parte B	- 36 -

4.2.1. Determinação da potência correspondente às correntes de saída.....	- 36 -
4.2.2. Determinação da potência correspondente às correntes de entrada.....	- 38 -
5. Otimização energética da máquina ZELL	- 41 -
5.1. Aproveitamento energético dos gases de combustão	- 41 -
5.2. Redução do caudal de água de arrefecimento	- 46 -
6. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	- 47 -
Bibliografia	- 49 -
ANEXOS.....	- 51 -
Anexo A - Propriedades físicas	- 52 -
A.1. Gás natural.....	- 52 -
A.2. Ar.....	- 52 -
A.3. Água.....	- 54 -
Anexo B - Exemplos de cálculo	- 56 -
B.1. Conversão de energia elétrica e de gás natural para tep.....	- 56 -
B.2. Cálculo do caudal volumétrico e mássico do ar nos queimadores	- 56 -
B.3. Cálculo do caudal mássico dos gases de combustão	- 56 -
B.4. Cálculo da entalpia específica dos gases.....	- 57 -
B.5. Cálculo da entalpia específica do ar	- 57 -
B.6. Cálculos de otimização.....	- 58 -
B.6.1. Pré-aquecimento do ar fresco	- 58 -
B.6.2. Pré-aquecimento do ar de combustão.....	- 59 -
B.6.3. Cálculo poupança anual de gás natural	- 60 -
B.7. Cálculo da potência transferida pelos fluidos no permutador	- 60 -
Anexo C – Valores medidos do volume de gás natural	- 61 -

Índice de tabelas

Tabela 3.1 – Quantidade produzida dos vários artigos na máquina ZELL	15 -
Tabela 3.2 – Fatores de conversão de energia elétrica e toneladas de gás natural para tep [9]	16 -
Tabela 3.3 – Consumo energético mensal da empresa e da ZELL em tep	16 -
Tabela 3.4 – Temperaturas das sete estufas para os diferentes artigos em poliéster.....	18 -
Tabela 3.5- Composição volumétrica dos componentes do gás natural	18 -
Tabela 3.6 – Valores médios do caudal volumétrico de gás natural para os vários artigos em poliéster	19 -
Tabela 3.7- Velocidades do ar na entrada dos queimadores das estufas	20 -
Tabela 3.8 – Dimensões das grelhas dos queimadores.....	20 -
Tabela 3.9- Valores obtidos para o caudal volumétrico e mássico do ar nos queimadores	21 -
Tabela 3.10- Temperaturas médias do ar nos pisos da máquina para os vários artigos em poliéster	22 -
Tabela 3.11- Caudais volumétrico e mássico do ar fresco na entrada e saída da tela dos orifícios das estufas	22
-	
Tabela 3.12- Características da tela para cada artigo em poliéster.....	23 -
Tabela 3.13- Temperatura e consumo de água para cada artigo.....	23 -
Tabela 3.14- Características de escoamento dos gases e respetiva composição nas chaminés da máquina [13]..	24 -
Tabela 3.15 – Valores obtidos para a massa volúmica e o caudal mássico e molar dos gases de combustão nas chaminés	25 -
Tabela 3.16- Composição dos componentes da solução de ativação.....	25 -
Tabela 3.17 – Valores da massa inicial e final do banho da solução em intervalos de tempo de 15 minutos e respetivo caudal mássico da solução de ativação.....	26 -
Tabela 4.1- Valores das constantes necessárias ao cálculo do calor específico dos gases de combustão.....	30 -
Tabela 4.2- Fração molar e entalpia específica dos gases de combustão na chaminé 1	30 -
Tabela 4.3- Fração molar e entalpia específica dos gases de combustão na chaminé 2.....	31 -
Tabela 4.4 – Valores das constantes para o cálculo da entalpia específica do gás natural	33 -
Tabela 4.5 – Valores da fração molar e da entalpia específica do gás natural	33 -
Tabela 4.6 – Valores das constantes necessárias ao cálculo da entalpia específica do ar.....	34 -
Tabela 4.7 – Valores das potências das correntes de entrada e saída da parte A	36 -
Tabela 4.8 – Frações molares e valores calculados para a entalpia específica dos gases na chaminé 3	37 -
Tabela 4.9 – Valores das potências das correntes de entrada e saída da parte B	40 -
Tabela 5.1 – Caudal mássico, temperaturas e potência do fluido frio para as temperaturas impostas	44 -
Tabela 5.2 – Valores do investimento, período de retorno e poupança anual para o ar fresco.....	44 -
Tabela 5.3 – Valores das potências térmicas necessárias ao pré aquecimento do ar de combustão	45 -
Tabela 5.4 – Valores do investimento, período de retorno e poupança anual para o ar de combustão	45 -

Índice de figuras

Figura 1.1 – Instalações da Indústria Têxtil do Ave (1950) [3]	- 1 -
Figura 1.2 – Instalações da atual Indústria Têxtil do Ave [5]	- 2 -
Figura 1.3 – Componentes do pneu [7]	- 3 -
Figura 2.1 – Máquina ZELL	- 7 -
Figura 2.2 – Queimador da estufa 2 a 7 (esquerda) e queimador A da estufa 1 (direita)	- 8 -
Figura 2.3 – Ventilador inferior da estufa (esquerda) e variador de frequência (direita)	- 8 -
Figura 2.4 – Grupo trator (esquerda) e motor elétrico do grupo trator (direita)	- 9 -
Figura 2.5 – Esquema representativo da máquina ZELL	- 12 -
Figura 3.1 – Representação esquemática da grelha do queimador da estufa 1 (esquerda) e da grelha dos queimadores das estufas 2 a 7 (direita) e respetivos pontos de medição da velocidade	- 19 -
Figura 4.1- Esquema representativo das correntes de entrada e saída da máquina ZELL que englobam o balanço à parte A	- 28 -
Figura 4.2- Esquema representativo das correntes de entrada e saída da máquina ZELL que englobam o balanço à parte B	- 28 -
Figura 5.1 - Análise do consumo de gás com o aumento da temperatura do ar	- 42 -
Figura 5.2 – Valores da poupança anual de gás natural	- 42 -
Figura 5.3 – Esquema representativo do permutador de fluxo cruzado	- 43 -

1. Introdução

Com o passar dos anos o meio ambiente está a mudar. Esta mudança acontece devido a fatores tecnológicos e económicos que levam a um maior consumo energético, e torna-se cada vez mais importante a racionalização da energia visando a eficiência energética e a utilização de energias renováveis. [1]

Atualmente as indústrias têm em conta o uso racional de utilidades na indústria, tais como o vapor, a água e a energia elétrica, de forma a garantir a sua competitividade e sustentabilidade e assim permitir uma redução nos consumos energéticos e no impacto ambiental.

A eficiência energética é conseguida por uma gestão energética eficaz que atua na redução de custos energéticos sem danificar o produto final. [2]

A *Continental – Indústria Têxtil do Ave, S.A (C-ITA)* tem o papel importante de fabrico das telas para os pneus da *Continental*. Desta forma, a empresa tem como preocupação a qualidade da tela e, também o controlo dos consumos energéticos contribuindo para a redução destes e para a minimização do impacto ambiental.

De seguida será apresentada a empresa *Continental – Indústria Têxtil do Ave* e a *Cofely GDF Suez – Energia e Serviços Portugal, S.A* e descrito o processo de fabrico das telas.

1.1. Apresentação da empresa

1.1.1. Continental – Indústria Têxtil do Ave, S.A

A *Indústria Têxtil do Ave - ITA* (figura 1.1), localizada em Lousado, foi fundada oficialmente a 16 de dezembro de 1948 por Henrique Malheiro com o objetivo de produzir as telas de reforço dos pneus da *Mabor*. Na altura era chamada de *INTEX*. Só em 1950 é que a ITA iniciou o seu trabalho usando o algodão para a produção das telas. [3,4]



Figura 1.1 – Instalações da Indústria Têxtil do Ave (1950) [3]

Em 1951 foi instalada uma secção de fiação e, mais tarde, em 1958 o rayon de alta tenacidade vem substituir o algodão. Este feito trouxe uma mudança tecnológica e de processos de fabrico. Esta mudança implicava um acabamento final nos tecidos de rayon, dip and dry, de forma a garantir a adesão dos componentes da borracha ao tecido.

Entre 1962 e 1963, foram impostas novas mudanças na matéria-prima baseadas em novos produtos de síntese, como a poliamida/nylon de alta tenacidade como base dos tecidos de reforço para construção de pneus. Mais uma vez a ITA teve de alterar as técnicas de fabrico a nível da torcedura e tecelagem. [4]

Na década de 70/80 houve um grande projeto de inovação e aumento da capacidade de produção da unidade industrial, nomeadamente na renovação do setor de torcedura e na aquisição de mais uma máquina de impregnar. [3]

Em 1987 deixou-se de utilizar algodão na indústria de pneus, o que levou ao encerramento da área de fiação e tecelagem do algodão na empresa. Em 1988, o Banco Borges & Irmão vendeu ao grupo Amorim a sua participação na INTEX o que fez com que a partir deste momento, a empresa se chamasse ITA.

Em 1993, a ITA foi uma das primeiras empresas a conseguir o certificado do Sistema de Gestão da Qualidade (norma ISO9002) e, em 1998, conseguiu a certificação do Sistema da Gestão Ambiental (norma ISO14001).

No início do século XXI, procedeu-se à modernização das áreas de torcedura, tecelagem e impregnação aumentando a capacidade de produção.

Atualmente, a ITA (figura 1.2) tem uma área total de 52 329 m² e tem uma produção anual de 14 mil toneladas de tecidos e cordas para pneus. Na produção destes são utilizadas como matérias-primas o rayon, nylon, poliéster e aramida. [4]



Figura 1.2 – Instalações da atual Indústria Têxtil do Ave [5]

1.1.2. Cofely GDF Suez – Energia e Serviços Portugal, S.A

A *Cofely* pertence ao grupo GDF Suez Energy Services, engloba as atividades de serviços de energia, de forma a possibilitar que as empresas utilizem melhor a sua energia reduzindo o impacto ambiental. Dedicar-se também à Gestão Técnica e Facility Management (Gestão de instalações) e desta forma oferece aos seus clientes uma gama de serviços mais completa, tendo em conta o projeto, a implementação e a exploração de soluções que visem uma melhor utilização das energias e a diminuição do seu impacto no ambiente.

A *Cofely* segue uma Política Integrada de Qualidade, Ambiente, Energia e Segurança. Esta política tem como objetivo desenvolver o crescimento sustentável aproveitando a posição e negócios do grupo de forma a transformar-se numa marca de desenvolvimento sustentável.

É de salientar que a política do Desenvolvimento Sustentável assenta nas seguintes orientações: mercado, partes interessadas externas e empregados.

Em suma, a *Cofely* é certificada de acordo com as normas de qualidade, energia e segurança e, desta forma, possui as certificações profissionais necessárias ao cumprimento da regulamentação em vigor. [6]

1.2. Processo de fabrico das telas

Antes de descrever o processo de fabrico das telas é importante evidenciar a funcionalidade da tela nos pneus. Os pneus produzidos pela *Continental* são constituídos por oito partes (figura 1.3), sendo elas a banda de rodagem (1), as lonas de reforço (2 e 3), a carcaça (4), o revestimento interior (5), a parede lateral (6), o talão (7) e os arcos de talão (8). [7]



Figura 1.3 – Componentes do pneu [7]

Todos os constituintes do pneu asseguram a sua aderência ao solo e facilitam a atração do mesmo. Além disto, participam na suspensão, amortecem e reduzem os impactos resultantes da irregularização do solo.

A carcaça é uma cobertura têxtil de corda feita em poliéster, nylon, aramida ou rayon, produzida pela ITA. Esta tem como função controlar a pressão interna e conservar a forma do pneu. [7]

Como já foi referido anteriormente a C-ITA produz telas e cordas para pneus usando como matéria-prima o rayon, nylon, poliéster e aramida. Estes tecidos, têm como designação *Cordfabric*, são o principal constituinte de reforço dos pneus.

Inicialmente o processo denominado por torcedura, permite a produção de cordas através da torção do fio. Esta torção contribui para o aumento da resistência do material ao desgaste por fricção. As bobines de fio são colocadas nos torcedores de forma a conseguirem torcer dois ou mais fios por corda. Como seria de esperar, para o mesmo comprimento, o peso da corda será maior do que o peso do fio. Este aumento de resistência que os fios adquirem é medido em *decitex* (peso por cada 10 mil metros).

Depois da torcedura, as bobines de corda passam para o processo de tecelagem. Nesta fase as bobines são alinhadas em série e em paralelo sendo que a corda é presa ao tear. Do tear sai uma tela enrolada formando um rolo. Neste processo utiliza-se um fio de algodão transversalmente às cordas com o objetivo de alinhar as cordas ficando todas à mesma distância umas das outras. O produto que se obtém por este processo chama-se “tecido verde”.

Estes produtos seguem para a última etapa a que se chama processo de impregnação. Na ITA existe a impregnação de corda (na máquina *Single End*) e a impregnação de tela (na máquina *ZELL*). Esta fase serve para conferir adesão da corda e/ou da tela à borracha e conceder estabilidade dimensional. [4][8]

Concluindo, a ITA produz a tela e a corda para a confeção dos pneus tendo em conta os seguintes processos principais: torcedura, tecelagem e impregnação.

1.3. Objetivo do trabalho

A empresa tem um papel fundamental na impregnação das telas. A máquina *ZELL* constitui a sua secção de impregnação e é responsável pela impregnação das telas para os pneus. Esta secção representa um forte consumidor de gás natural no contexto global da empresa.

Assim, surgiu a necessidade de estudar e otimizar a secção de impregnação da empresa, de forma a assinalar possíveis medidas de otimização energética.

1.4. Organização do trabalho de dissertação

O presente trabalho de dissertação foi organizado em cinco capítulos.

No presente capítulo foi feita uma apresentação da empresa C-ITA, empresa onde se desenvolveu o estudo e também da Cofely. Ainda neste capítulo foi descrito o fabrico das telas na empresa.

No capítulo 2 é feita uma abordagem à máquina ZELL, utilizada na impregnação das telas, descrevendo os seus constituintes e a funcionalidade dos mesmos na impregnação.

No capítulo 3 é apresentado o levantamento energético realizado na empresa de modo a recolher os dados necessários à otimização. Neste capítulo faz-se também uma avaliação da utilidade com maior consumo na máquina ZELL.

No capítulo 4 procede-se à análise energética do artigo mais produzido na C-ITA, tendo como objetivo avaliar as perdas energéticas no sistema em estudo.

No capítulo 5 apresentam-se as medidas de otimização energética para a máquina ZELL referindo a análise económica das mesmas.

No capítulo 6 são referidas as principais conclusões retiradas do trabalho efetuado e ainda algumas sugestões para trabalhos futuros.

2. A máquina ZELL

Como referido no capítulo anterior as telas produzidas na C-ITA são impregnadas na máquina ZELL, que pertence à secção de impregnação da empresa.

2.1. Constituintes da máquina ZELL

A máquina ZELL (figura 2.1) consiste numa máquina com sete estufas, cinco grupos tratores, duas tinas (uma com a solução de ativação e outra com solução de impregnação), dois acumuladores (um de entrada e outro de saída), desenrolador do “tecido verde”, enrolador da tela, sistema de vácuo e rolos. Esta máquina tem uma altura de cerca de 30 metros e distribuiu-se por sete pisos. [8]



Figura 2.1 – Máquina ZELL

Cada constituinte da máquina tem uma função específica. De seguida, serão descritos os constituintes da máquina e as suas funções.

Estufas

A máquina ZELL é constituída por setes estufas. As estufas 1 e 2 iniciam-se no piso 1 enquanto as estufas 3 a 7 têm início no piso 2.

Todas as estufas possuem um queimador de gás (figura 2.2) à exceção da estufa 1 que tem dois queimadores (queimador A e queimador B). Nos queimadores existe a combustão do gás natural de forma a permitir a libertação de calor necessária às condições requeridas no interior de cada estufa.



Figura 2.2 – Queimador da estufa 2 a 7 (esquerda) e queimador A da estufa 1 (direita)

Na máquina ZELL existem ainda três chaminés por onde são libertados os gases de combustão. Os gases de combustão da estufa 1 saem pela chaminé 1, os gases da estufa 2 a 4 pela chaminé 2 e os gases das estufas 5 a 7 pela chaminé 3.

Cada estufa possui um ventilador superior, um ventilador inferior (figura 2.3 - esquerda) e um exaustor. A temperatura no interior das estufas é homogeneizada através do ar aspirado pelos ventiladores existentes nas estufas. Estes equipamentos têm associados variadores de frequência (figura 2.3 – direita) que demonstram a temperatura e frequência do equipamento na respetiva estufa.



Figura 2.3 – Ventilador inferior da estufa (esquerda) e variador de frequência (direita)

Ao longo das estufas existem várias sondas de temperatura que permitem verificar a temperatura em vários pontos da estufa. As estufas operam entre 150 e 250 °C dependendo das especificações necessárias à impregnação da tela para o cliente.

Grupos tratores

Na máquina ZELL existem cinco grupos tratores. Estes são constituídos por conjuntos de rolos que encaminham a tela ao longo da máquina. Os grupos tratores são acionados por um motor elétrico e no interior dos rolos circula água proveniente da torre de arrefecimento que permite o arrefecimento dos rolos.

Na figura 2.4 está representado um grupo trator e um motor elétrico.



Figura 2.4 – Grupo trator (esquerda) e motor elétrico do grupo trator (direita)

Tinas

Na máquina existem duas tinas com soluções diferentes. Na tina 1 encontra-se a solução de ativação e na tina 2 a solução de impregnação. No capítulo 3 aborda-se a composição destas soluções.

Acumuladores

No início, a tela verde passa pelo acumulador de entrada que acumula tecido de forma a possibilitar a produção em contínuo.

O acumulador de saída acumula o tecido impregnado de modo a facilitar a retirada do rolo sem paragem da máquina.

Desenrolador e enrolador

O tecido verde depois de chegado à secção de impregnação – máquina ZELL é desenrolado e encaminhado para o acumulador de entrada. No final do processo a tela impregnada é enrolada e embalada para o cliente.

Sistema de vácuo

O sistema de vácuo situa-se no piso 1 logo a seguir à tina da solução de ativação. Este tem o papel de remover o excesso de soluto.

Rolos

De forma a aquecer a tela, esta é encaminhada através de rolos que têm a circular no seu interior água de refrigeração proveniente da torre de arrefecimento.

A água sai da torre de arrefecimento pelo primeiro tanque, tanque de armazenamento de água fria (a cerca de 30°C) entrando nos rolos. Quando regressa à torre a uma temperatura mais alta entra num segundo tanque, reservatório da água quente. A água é enviada à torre de arrefecimento através de uma bomba centrífuga e é reposta no primeiro tanque. [4]

Em equipamentos como as torres de arrefecimento existem perdas de calor por evaporação e arraste da água. Para compensar estas perdas e manter o volume de água constante no sistema é adicionada água de reposição.

Os rolos são fabricados em aço carbono cromado e têm duas formas de escoamento. A maioria dos rolos possui uma única passagem de água com uma extremidade de entrada e uma extremidade oposta de saída da água. Os rolos dos grupos tratores possuem outra configuração de escoamento em que a água entra e sai pela mesma extremidade sem existir mistura dessa água de circulação com a água que se encontra no interior do rolo. [4][8]

2.2. Funcionamento da máquina ZELL

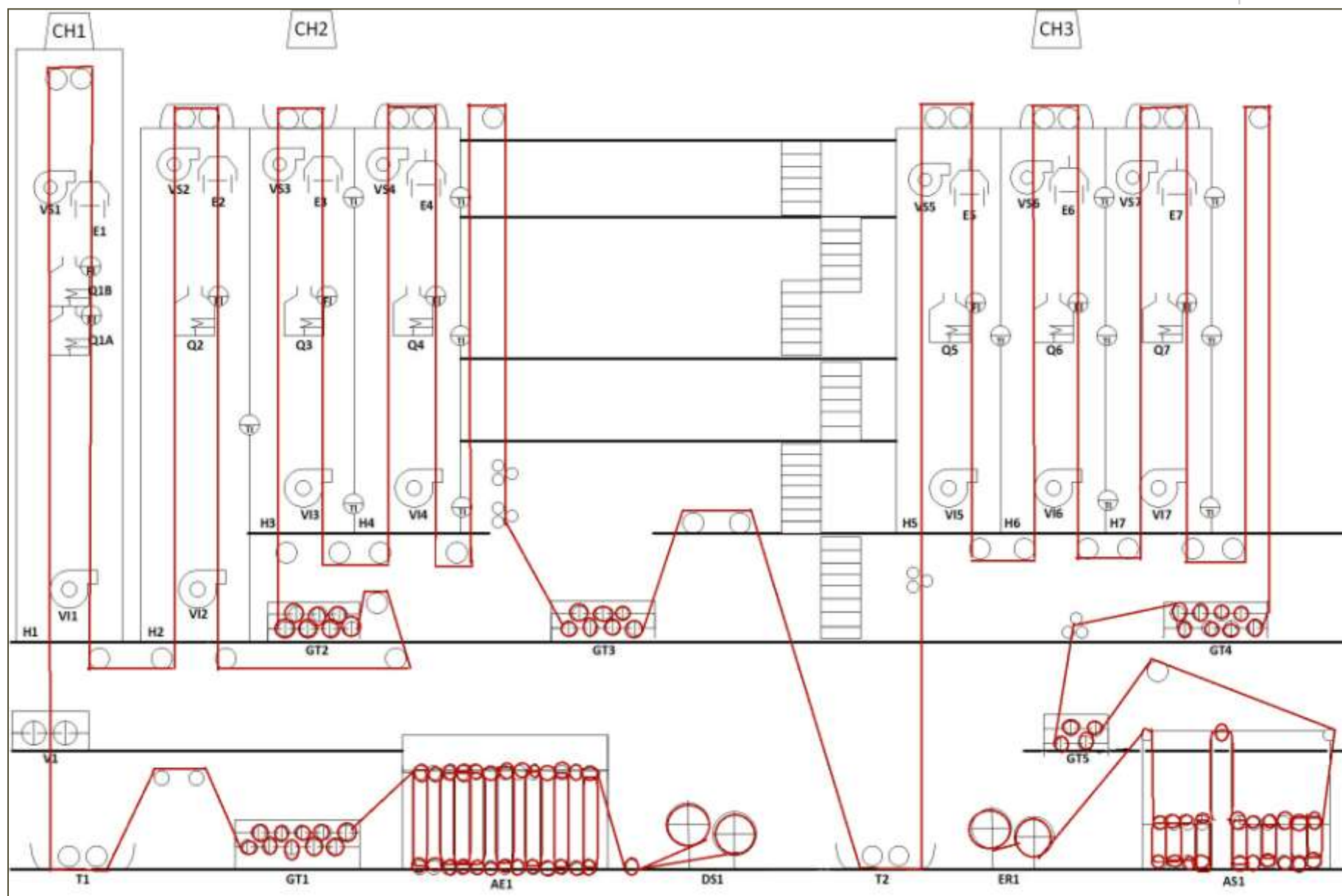
Na figura 2.5 é possível observar um esquema representativo da máquina ZELL, identificando os constituintes da mesma e visualizar o caminho percorrido do tecido verde até à tela impregnada.

Inicialmente o “tecido verde” passa pelo acumulador de entrada, pelo primeiro grupo trator (grupo trator 1) e pela primeira solução química (tina 1) que ativa o tecido. De seguida é encaminhado a um sistema de vácuo, de forma a retirar o excesso de

solução absorvida na tina 1, e é encaminhado com ajuda de rolos para a estufa 1 percorrendo em contínuo a estufa 2, 3 e 4.

A tela ao sair da estufa 4 passa por mais um grupo trator (grupo trator 3) e pela solução de impregnação (tina 2). Neste ponto entra na estufa 5 e segue até à estufa 7. Na saída da última estufa a tela passa pelo grupo trator 4 e 5 e é encaminhada ao acumulador de saída para posteriormente ser enrolada obtendo-se assim o produto final. É de salientar que com a existência de um acumulador de entrada e outro de saída é possível operar continuamente. [4][8]

A máquina trabalha 24h por dia, todos os dias do ano com apenas uma paragem de 6h por semana para limpeza e manutenção.



- DS1** – Desenrolador do tecido verde
- AE1** – Acumulador de entrada
- GT** – Grupo trator
- T1** – Tina com a solução de ativação
- T2** – Tina com solução de impregnação
- H** – Estufa
- VI** – Ventilador inferior da estufa
- VS** – Ventilador superior da estufa
- Q** – Queimador de gás natural da estufa
- E** – Exaustor da estufa
- TI** – Indicador de temperatura
- FI** – Indicador de caudal de gás consumido
- AS1** – Acumulador de saída
- ER1** – Enrolador da tela impregnada

Figura 2.5 – Esquema representativo da máquina ZELL

2.3. Utilidades da máquina ZELL

No sistema da máquina ZELL existem várias utilidades tais como água, ar comprimido, gás natural e energia elétrica.

Água

Na máquina ZELL existe um circuito de arrefecimento da água dos rolos.

Primeiramente a água é bombeada do tanque de água fria para os rolos da máquina. Esta água passa no interior dos rolos ocorrendo transferência de calor para a mesma, saindo depois a uma temperatura superior à de entrada. A água que sai dos rolos é conduzida para a torre de arrefecimento evaporativa de contacto direto, uma vez que existe contacto da água com o ar em contracorrente. A água arrefecida é enviada novamente para o tanque de água fria.

Neste processo existe perda de água por evaporação e por fugas, logo existe água de compensação introduzida na torre sempre que o nível de água, controlado por uma electroválvula, não esteja no nível desejado. [4][8]

Ar comprimido

As tampas das estufas 2, 3, 4, 6 e 7 possuem um sistema pneumático. Para além do consumo de ar comprimido neste sistema também existe o consumo de ar comprimido no sistema de vácuo com o objetivo de retirar o excesso de soluto existente no tecido.

Gás natural

Todas as estufas existentes na máquina ZELL têm um queimador, à exceção da estufa 1 que tem dois queimadores (queimador A e queimador B), como referenciado no esquema da figura 2.5. No queimador é injetado gás natural para que se dê a reação de combustão permitindo aquecer o interior das estufas.

Energia elétrica

Os equipamentos que consomem energia elétrica são os ventiladores e exaustores das estufas e os motores dos grupos tratores.

As utilidades com maior consumo na máquina ZELL são o gás natural e a energia elétrica, e por isso, serão essas as utilidades estudadas no levantamento energético.

3. Levantamento energético

O uso racional de energia numa empresa é fundamental. Para o averiguar foi necessário realizar um levantamento energético de forma a assegurar a competitividade das empresas.

Inicialmente fez-se o levantamento da quantidade de artigos mais produzidos anualmente na ZELL no ano de 2014 e contabilizou-se as utilidades essenciais: energia elétrica e gás natural, tendo como objetivo determinar o consumo específico de cada artigo e, assim selecionar o que tem maior impacto na fatura da empresa.

3.1. Produção anual da ZELL

No ano de 2014 foram impregnadas na máquina ZELL telas de poliéster, nylon e rayon num total de 12787 ton. Na tabela 3.1 encontra-se a quantidade produzida dos referentes artigos.

Tabela 3.1 – Quantidade produzida dos vários artigos na máquina ZELL

Artigo	Kg	%
NYLON	$3,46 \times 10^6$	27
POLIÉSTER	$8,25 \times 10^6$	65
RAYON	$1,07 \times 10^6$	8
Total	$1,28 \times 10^7$	100

É possível verificar que 65% da produção de telas foram de artigo em poliéster.

Na empresa são impregnadas várias telas de artigo em poliéster. A designação dos sete artigos em poliéster estudados no levantamento energético será feita com a letra P seguida de numeração, como por exemplo P1 - poliéster 1.

Importa realçar que, segundo informação da empresa, o artigo em poliéster mais produzido na ZELL no referente ano foi o artigo referenciado com a designação P3.

3.2. Consumo energético

O consumo energético da ZELL foi determinado através da análise das faturas de energia elétrica e de gás natural. Como ambas as energias estão expressas em unidades diferentes e para ser possível a comparação foi necessário converter os valores em tep. Segundo o Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia (SGCIE) os fatores de conversão de energia são os que constam na tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Fatores de conversão de energia elétrica e toneladas de gás natural para tep [9]

Energia elétrica	0,000215 tep/kWh
Gás natural	1,077 tep/ton

Os valores de energia consumidos na empresa e na ZELL foram retirados das faturas mensais de energia elétrica e de gás natural e encontram-se na tabela 3.3. A conversão de energia elétrica em tep foi feita tendo em conta o valor que consta na tabela 3.2. Para converter a quantidade de gás natural em tep foram necessários o valor do PCS de 11,8 kWh/m³ e a massa volúmica do gás de 0,8141 kg/m³ (Anexo A). [10] O exemplo de cálculo pode ser consultado no anexo B – B.1.

Tabela 3.3 – Consumo energético mensal da empresa e da ZELL em tep

Mês	Energia elétrica			Gás natural				
	Total	Zell		Total		Zell		
	kWh	KWh	tep	kWh	m ³	m ³	ton	tep
JANEIRO	2.491.846	160.944	34,6	2.178.583	184.626	86.803	70,7	76,1
FEVEREIRO	2.306.133	148.513	31,9	2.224.830	188.545	89.374	72,8	78,4
MARÇO	2.649.914	182.683	39,3	2.512.383	212.914	98.557	80,2	86,4
ABRIL	2.499.186	168.410	36,2	2.128.375	180.371	86.517	70,4	75,9
MAIO	2.729.893	177.632	38,2	2.242.604	190.051	85.441	69,6	74,9
JUNHO	2.764.816	179.142	38,5	2.294.385	194.439	89.388	72,8	78,4
JULHO	2.680.103	183.155	39,4	2.347.805	198.967	97.823	79,6	85,8
AGOSTO	2.165.777	175.460	37,7	2.115.824	179.307	80.156	65,3	70,3
SETEMBRO	2.612.080	185.908	40,0	2.318.588	196.491	95.409	77,7	83,7
OUTUBRO	2.778.975	189.038	40,6	2.307.605	195.560	91.261	74,3	80,0
NOVEMBRO	2.607.871	178.900	38,5	2.454.906	208.043	84.423	68,7	74,0
DEZEMBRO	1.447.134	103.338	22,2	1.565.704	132.687	66.894	54,5	58,7
TOTAL	29.733.728	2.033.123	437,1	26.691.592	2.261.999	1.052.044	856,5	922,4
% Energia máquina ZELL		7				47		

Pela observação da tabela 3.3 verifica-se que da energia elétrica consumida anualmente pela empresa 7% corresponde ao gasto da máquina ZELL. Relativamente ao gás natural a ZELL é responsável pelo consumo de 47%. Além disso, da energia total consumida anualmente pela ZELL, que corresponde a 1360 tep, 32% é relativo à energia elétrica e os restantes 68% ao consumo de gás natural.

O gás natural será então a utilidade a estudar neste trabalho, uma vez que é aquela que representa maior impacto quer na máquina de impregnar as telas quer na totalidade da

empresa. O gás natural é utilizado nos queimadores da máquina ZELL para a impregnação das telas.

Pode-se ainda concluir que a empresa é consumidora intensiva de energia, uma vez que o seu consumo anual excede os 500 tep. [9] A otimização deve ser feita relativamente ao gás natural consumido.

3.3. Consumo específico

O consumo específico de um artigo é determinado pelo quociente entre o consumo total de energia e a produção total do artigo.

Como os valores apresentados na tabela 3.3 correspondem à energia total gasta na ZELL para a produção de todas as telas não foi possível avaliar o consumo específico dos vários artigos impregnados. A quantidade anual impregnada de cada artigo encontra-se na tabela 3.1.

3.4. Dados experimentais

No início do trabalho na empresa foram recolhidos dados experimentais não só para o artigo mais produzido (P3) como para todos os outros artigos em poliéster.

Os dados recolhidos na máquina ZELL foram as temperaturas de operação nas estufas, composição e volume de gás natural, velocidade média e caudal mássico do ar nas grelhas dos queimadores, temperatura do ar nos pisos da ZELL, caudais volumétricos e mássicos do ar fresco, características da tela, temperaturas e consumos de água, caudal mássico dos gases de combustão, características da solução de ativação e da solução de impregnação.

3.4.1. Temperaturas de operação nas estufas

De acordo com o esquema da máquina ZELL apresentado no capítulo 2 esta é constituída por sete estufas. As temperaturas das estufas foram lidas no painel de controlo que se situa no piso 0 da máquina. Na tabela 3.4 estão representados os valores lidos das temperaturas das setes estufas e para os diferentes artigos em poliéster.

Tabela 3.4 – Temperaturas das sete estufas para os diferentes artigos em poliéster

ARTIGO ESTUFA	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
	T (°C)						
1A	175	175	175	175	175	175	175
1B	175	175	175	175	175	175	175
2	175	175	176	176	175	176	175
3	250	248	250	249	248	250	249
4	250	248	251	250	248	250	250
5	150	150	151	150	150	150	150
6	250	247	250	250	245	248	250
7	250	247	250	249	245	248	250

As temperaturas de operação nas estufas para os vários artigos em poliéster são semelhantes. As estufas 3, 4, 6 e 7 são as que operam a temperaturas mais altas.

3.4.2. Composição e volume de gás natural

Na tabela 3.5 encontram-se os valores da percentagem volumétrica do gás natural usado nos queimadores [10].

Tabela 3.5- Composição volumétrica dos componentes do gás natural

Componente	% (v/v)
CH₄	87,885
C₂H₆	8,056
C₃H₈	1,378
N₂	1,088
CO₂	1,266
OUTROS	0,327

A leitura de volume de gás gasto na combustão foi feita nos contadores da ZELL para um dado intervalo de tempo.

O volume de gás para os vários artigos em poliéster foi lido em vários ensaios e encontra-se no anexo C. Os valores apresentados nesse anexo dizem respeito a leituras diretas dos contadores que estão calibrados para pressão e temperatura fixa. Os valores

reais apresentados na tabela 3.6 são calculados multiplicando os valores lidos por um fator corretivo médio de 1,78.

Na tabela 3.6 apresentam-se os valores médios do caudal volumétrico de gás natural para os vários artigos em poliéster multiplicados pelo fator corretivo.

Tabela 3.6 – Valores médios do caudal volumétrico de gás natural para os vários artigos em poliéster

ARTIGO ESTUFA	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
$V_{\text{gás}}$ (m ³ /min)							
1A	0,713	0,704	0,660	0,712	0,689	0,696	0,728
1B	0,707	0,723	0,613	0,674	0,697	0,668	0,623
2	0,615	0,697	0,562	0,682	0,719	0,829	0,536
3	1,235	1,238	1,180	1,215	1,173	1,267	1,127
4	0,595	0,576	0,596	0,567	0,544	0,570	0,577
5	0,730	0,788	0,682	0,693	0,712	0,796	0,636
6	1,009	1,007	0,963	0,987	0,948	1,053	0,922
7	0,677	0,649	0,677	0,667	0,613	0,688	0,653
Caudal volumétrico médio total (m³/min)	6,28	6,38	5,93	6,20	6,09	6,57	5,80

3.4.3. Velocidade média e caudal mássico do ar nas grelhas dos queimadores

A velocidade do ar à entrada dos queimadores foi medida com um anemómetro (Testo 450) em quatro pontos da grelha. Os queimadores da estufa 1 são diferentes dos queimadores das estufas 2 a 7. Na figura 3.1 pode-se verificar a representação esquemática das grelhas dos queimadores.

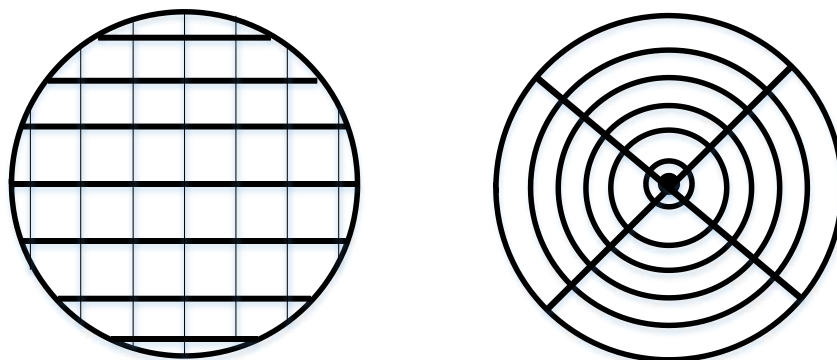


Figura 3.1 – Representação esquemática da grelha do queimador da estufa 1 (esquerda) e da grelha dos queimadores das estufas 2 a 7 (direita) e respetivos pontos de medição da velocidade

Para a grelha correspondente à estufa 1 a velocidade foi lida no centro das várias secções retangulares. E para a grelha das estufas 2 a 7 leu-se a velocidade na zona central e nas zonas médias das várias secções anelares da conduta. Estas secções anelares e a zona central têm todas a mesma área.

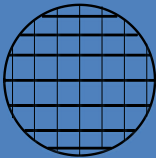

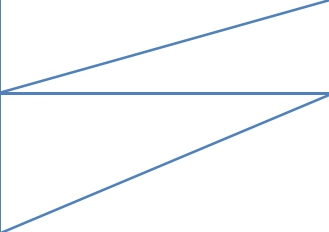
Na tabela 3.7 estão representados os valores da velocidade do ar medidos em cada grelha dos queimadores das estufas. Estas velocidades foram medidas a 24°C.

Tabela 3.7- Velocidades do ar na entrada dos queimadores das estufas

Queimador da estufa	Velocidades medidas (m/s)				v_a (m/s)
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	
1^a	23,8	31,2	32,8	25,8	28,4
1B	26,7	24,2	27,8	30,2	27,2
2	20,2	30,1	21,4	14,4	21,5
3	20,1	26,9	17,8	21,2	21,5
4	21,4	20,6	20,5	18,9	20,4
5	25,8	30,2	27,8	25,8	27,4
6	27,7	26,2	26,8	29,2	27,5
7	26,2	30,1	27,4	24,4	23,0

Para determinar a área de passagem livre de ar pelos queimadores das estufas foi necessário, com a ajuda de um paquímetro, determinar o diâmetro das grelhas, comprimento e largura dos arames. Na tabela 3.8 encontram-se os valores das dimensões das grelhas.

Tabela 3.8 – Dimensões das grelhas dos queimadores

Representação da grelha no queimador		
Estufa	1	2 a 7
Diâmetro (cm)	16,8	20,8
Espessura arame/aro (cm)	0,093	0,54
Largura retângulo (cm)	0,6	
Comprimento do retângulo (cm)	0,7	

Antes de determinar a área de passagem do ar na grelha do queimador da estufa 1 foi necessário determinar o número de retângulos que existem na grelha. Desta forma, fez-se:

$$A_{gr,1} = n^{\circ}_{\text{retângulos}} \times A_{e,\text{ret}} \quad (3.1)$$

E então:

$$\frac{\pi \times 0,168^2}{4} = n^{\circ}_{\text{retângulos}} \times (0,006 + 0,00093) \times (0,007 \times 0,00093)$$

$$n^{\circ}_{\text{retângulos}} = 403$$

A área livre de passagem do ar foi calculada pela equação seguinte.

$$A_{ar,1} = n^{\circ}_{\text{retângulos}} \times A_{i,\text{ret}} \quad (3.2)$$

$$A_{ar,1} = 403 \times (0,006 \times 0,007) = 0,0169 \text{ m}^2$$

O valor obtido para a área da passagem do ar no queimador da estufa 1 foi de 0,0169 m².

A grelha dos queimadores das estufas 2 a 7 possui cinco aros. Para determinar a área de passagem do ar nestes queimadores retirou-se o valor do espaço ocupado pelos cinco aros ao valor do diâmetro da grelha do queimador.

$$A_{ar,2} = \frac{\pi}{4} \times (0,208 - 5 \times 0,0054)^2 = 0,0257 \text{ m}^2 \quad (3.3)$$

A área de passagem do ar nos queimadores das estufas 2 a 7 é de 0,0257 m².

Os valores obtidos para os caudais volumétrico e mássico calculados para os queimadores das estufas encontram-se na tabela 3.9. O exemplo de cálculo da determinação do caudal volumétrico e mássico do ar nos queimadores encontra-se no anexo B – B.2.

Tabela 3.9- Valores obtidos para o caudal volumétrico e mássico do ar nos queimadores

Queimador da estufa	v_q (m/s)	\dot{V}_g (m ³ /s)	\dot{m}_q (kg/s)
1A	28,4	0,480	0,569
1B	27,2	0,460	0,546
2	21,5	0,553	0,656
3	21,5	0,553	0,655
4	20,4	0,523	0,620
5	27,4	0,704	0,835
6	27,5	0,706	0,837
7	23,0	0,592	0,702

3.4.4. Temperatura do ar exterior nos pisos da ZELL

As temperaturas do ar nos diferentes pisos da máquina ZELL foram medidas por um termohigrómetro (Testo 625). Para todos os artigos foram feitas várias medidas da temperatura.

A temperatura do ar nos pisos da máquina foi lida para os diferentes artigos em poliéster. Os valores médios encontram-se na tabela 3.10.

Tabela 3.10- Temperaturas médias do ar nos pisos da máquina para os vários artigos em poliéster

ARTIGO	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
PISOS	T_p (°C)						
0 e 1	24	26	23	25	25	24	25
2	23	25	22	24	26	22	25
3	24	26	23	24	27	23	24
4	25	27	23	25	26	23	25
5	25	28	24	25	27	23	25
6	26	28	24	25	28	24	26

3.4.5. Caudais mássicos do ar fresco

Pelos orifícios de entrada e saída da tela existentes na parte inferior das estufas encontra-se ar fresco a entrar.

Tal como representado no esquema do capítulo 2 da máquina ZELL, as estufas 1 e 2 iniciam-se no piso 1 e as estufas de 3 a 7 no piso 2.

Os caudais mássicos do ar fresco foram retirados da tese de mestrado “Auditoria Energética à Indústria Têxtil do Ave” e encontram-se na tabela 3.11. [11]

Tabela 3.11- Caudais volumétrico e mássico do ar fresco na entrada e saída da tela dos orifícios das estufas

Estufa	Entrada da tela	Saída da tela
	$\dot{m}_{f,1}$ (kg/s)	$\dot{m}_{f,2}$ (kg/s)
1	3,48	2,77
2	2,72	2,05
3	2,99	3,22
4	1,13	0,85
5	1,93	1,39
6	1,85	1,66
7	1,22	1,20

3.4.6. Características da tela

Para cada artigo em poliéster registou-se o comprimento, o peso e a velocidade da tela. Os valores medidos encontram-se na tabela 3.12.

Tabela 3.12- Características da tela para cada artigo em poliéster

Artigo	Comprimento (m)	Peso em verde (kg)	Peso em impregnado (kg)	v_t (m/min)
P1	1856	1088	1125	75
P2	1569	1301	1118	80
P3	1948	969	1004	80
P4	1642	943	980	80
P5	1465	1195	1237	80
P6	1176	909	948	80
P7	1950	1457	910	80

3.4.7. Temperaturas e consumos de água

Na tabela 3.13 encontram-se os valores médios das temperaturas de entrada de água na máquina e do consumo de água de arrefecimento para cada artigo. Estes valores foram lidos no painel de controlo da torre de arrefecimento e nos contadores de água (contador junto do painel da torre e contador no piso 2).

Tabela 3.13- Temperatura e consumo de água para cada artigo

Artigo	$T_{a,e}$ (°C)	$\dot{V}_{\text{água}}$ (m ³ /min)
P1	31	0,0101
P2	32	0,0064
P3	31	0,0059
P4	32	0,0072
P5	32	0,0021
P6	32	0,0098
P7	30	0,0050

A temperatura de saída da água de arrefecimento da máquina ZELL é 40°C. Este valor foi obtido em trabalhos já realizados ao sistema de arrefecimento da água à máquina ZELL. [12]

3.4.8. Caudal mássico dos gases de combustão

Na máquina ZELL existem três chaminés. Pela chaminé 1 saem os gases de combustão da estufa 1, pela chaminé 2 saem os gases das estufas 2, 3 e 4 e pela chaminé 3 saem os gases das estufas 5, 6 e 7, como se pode confirmar pela figura 2.5.

Na tabela 3.14 encontram-se os valores das características de escoamento dos gases nas chaminés e a respetiva composição dos gases de combustão. Estes valores foram retirados do relatório da SONDAR de 2013 feito aos gases de combustão e cedido pela empresa para o presente estudo.

Tabela 3.14- Características de escoamento dos gases e respetiva composição nas chaminés da máquina [13]

Chaminé	1	2	3
$A_a \text{ (m}^2\text{)}$	0,7088	0,7088	0,7088
$P_c \text{ (hPa)}$	1018	1017	1018
$T_g \text{ (K)}$	415	459	451
$v_g \text{ (m/s)}$	4,0	11,6	8,2
$MM_g \text{ (g/mol)}$	28,2	28,4	28,7
Composição gases % (v/v)			
O_2	19,3	19,2	19,2
CO_2	0,9	0,9	0,9
CO	9,77E-04	6,46E-03	3,24E-03
NO_2	1,19E-03	1,47E-03	9,46E-04
SO_2	3,42E-04	3,53E-04	3,31E-04
H_2O	6,1	4,8	2,3

Pela composição dos gases de combustão apresentada na tabela 3.14 verifica-se que esta é muito semelhante à do ar atmosférico.

O caudal mássico dos gases de combustão foi determinado pela equação 3.4.

$$\dot{m}_g = v_g \times A_a \times \rho_g \quad (3.4)$$

Os valores obtidos para a massa volúmica e para o caudal mássico e molar encontram-se na tabela 3.15. O exemplo de cálculo encontra-se no anexo B – B.3.

Tabela 3.15 – Valores obtidos para a massa volúmica e o caudal mássico e molar dos gases de combustão nas chaminés

Chaminé	1	2	3
ρ_g (kg/m ³)	0,832	0,757	0,779
\dot{m}_g (kg/s)	2,36	6,22	4,53
\dot{m}_g (kmol/s)	0,0837	0,219	0,158

3.4.9. Características da solução de ativação

A solução de ativação é a solução que se encontra na tina 1 (figura 2.5). Esta é a solução pela qual a tela passa antes de entrar na primeira estufa. A composição desta solução apresenta-se na tabela 3.16 e foi fornecida pela empresa.

Tabela 3.16- Composição dos componentes da solução de ativação

Componente	Composição % (m/m)
Água	96,71
Componente A	0,75
Componente B	2,54

Como se pode verificar, pela análise da tabela, a água é o componente maioritário na solução. Desta forma, as propriedades físicas desta solução foram aproximadas às propriedades da água líquida.

Para determinar o caudal mássico da solução registou-se a massa inicial e final em intervalos de tempo de 15 minutos.

Na tabela 3.17 estão apresentados os valores lidos para as massas iniciais e finais da solução de ativação assim como o respetivo caudal mássico.

Tabela 3.17 – Valores da massa inicial e final do banho da solução em intervalos de tempo de 15 minutos e respetivo caudal mássico da solução de ativação

Leitura	$m_{início}$ (kg)	m_{fim} (kg)	$\dot{m}_{solução}$ (kg/s)
1	13956	13830	0,140
2	13830	13710	0,133
3	13710	13590	0,133
4	13590	13410	0,200
5	13410	13265	0,161
$\dot{m}_{solução\ médio}$			0,154

3.4.10. Características da solução de impregnação

A solução de impregnação é a solução que se encontra na tina 2 (figura 2.5). A tela mergulha nesta solução depois de sair da estufa 4 e antes de entrar na estufa 5. O caudal mássico da solução e o respetivo calor específico foram retirados de trabalhos já realizados na empresa.

O caudal mássico da solução de impregnação é 0,062 kg/s e o calor específico de 3,65 kJ/ (kg. °C) [11].

4. Análise energética

Nesta análise energética o consumo de gás natural é o parâmetro que se pretende avaliar e otimizar. Para isso, foi necessário recorrer a um balanço de energia e avaliar nas condições de operação o consumo de gás e, também as perdas térmicas existentes. Deste modo foi possível analisando as várias correntes energéticas envolvidas no balanço estudar soluções que possam diminuir esse consumo sem prejuízo do produto final.

Segundo a 1ª Lei da Termodinâmica:

$$q + W + \sum E_e - \sum E_s = \Delta U_{sistema} \quad (4.2)$$

Considerando sistema aberto a operar em estado estacionário num determinado intervalo de tempo, com $W=0$, o balanço pode escrever-se:

$$q + \sum_{i=0}^n E_{ei} - \sum_{i=0}^n E_{si} = 0 \quad (4.3)$$

Sendo

$$E_{e,i} = (E_{c,i} + E_{p,i} + h_{e,i}) \dot{m}_{e,i} \quad (4.4)$$

e

$$E_{s,j} = (E_{c,j} + E_{p,j} + h_{s,j}) \dot{m}_{s,j} \quad (4.5)$$

Considerando a energia potencial e a energia cinética desprezáveis o calor perdido no sistema em estudo foi determinado da seguinte forma:

$$q + \sum_{i=0}^n H_{ei} - \sum_{i=0}^n H_{si} = 0 \quad (4.6)$$

No presente estudo o aquecimento das estufas da máquina ZELL é efetuado por combustão de gás natural. Desta forma o balanço de energia apresentado na equação 4.6 escreve-se da seguinte forma:

$$q = \sum_{i=0}^n H_{si} + \Delta H_{reação,298}^0 - \sum_{i=0}^n H_{ei} \quad (4.7)$$

Tal como representado na figura 2.5 do capítulo 2, a tela verde percorre as quatro primeiras estufas e passa pela solução de impregnação entrando depois nas restantes estufas. De forma a proceder a uma avaliação energética mais eficiente do sistema em estudo, a análise energética foi dividida em duas partes, A e B, para a determinação da potência perdida. Isto acontece porque da saída da estufa 4 até à entrada da estufa 5 a tela passa por um grupo trator que se encontra no exterior. Nesta zona existe perdas térmicas adicionais que fazem parte do processo mas que não pode ser aproveitada relativamente à possibilidade de baixar o consumo de gás natural.

A parte A do balanço foi feita considerando um volume de controlo desde a solução de ativação (tina 1) até à saída da tela da estufa 4 e envolve as chaminés 1 e 2. As correntes de entrada e de saída envolvidas nesta parte são representadas no esquema da figura 4.1.

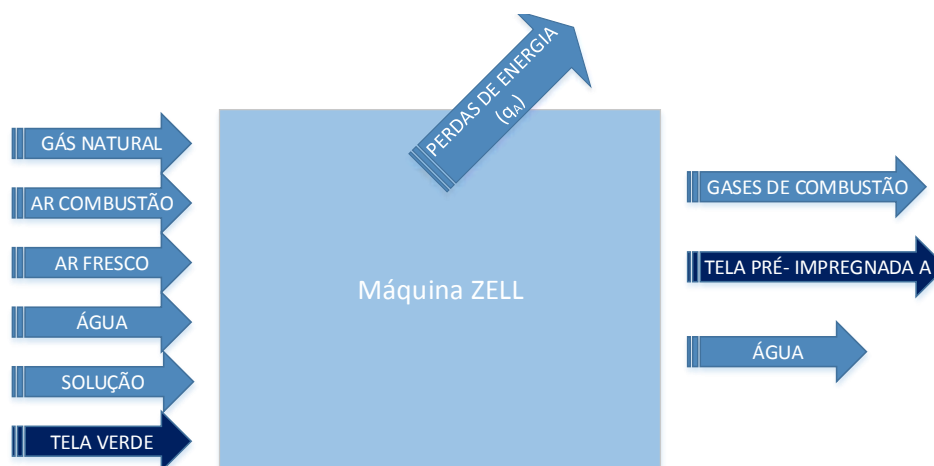


Figura 4.1- Esquema representativo das correntes de entrada e saída da máquina ZELL que englobam o balanço à parte A

A parte B do balanço foi feita considerando o volume de controlo desde a tela pré-impregnada B que passa na solução de impregnação (tina 2) até à tela impregnada e envolve a chaminé 3. As correntes de entrada e de saída envolvidas nesta parte encontram-se representadas na figura 4.2.

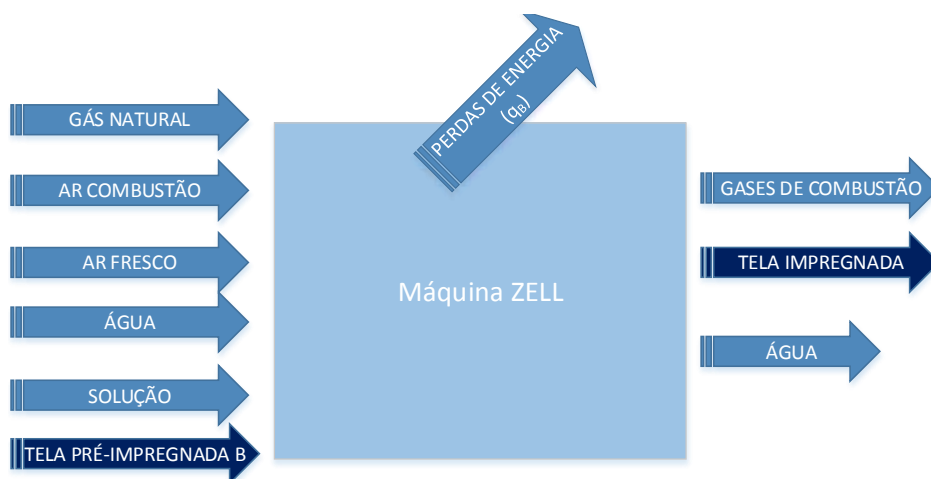


Figura 4.2- Esquema representativo das correntes de entrada e saída da máquina ZELL que englobam o balanço à parte B

A análise energética foi feita tendo como base o artigo em poliéster P3, artigo em poliéster mais produzido na ZELL. No entanto, esta análise poderia ter sido feita usando os valores médios dos vários artigos em poliéster referidos no levantamento energético, uma vez que os caudais médios são todos da mesma ordem de grandeza.

A quantidade de calor perdida na máquina ZELL em cada parte foi determinada pelo balanço de energia descrito pela equação 4.7. Primeiramente foi necessário calcular as potências correspondentes às correntes de saída e de entrada. A temperatura de referência usada foi de 25°C.

4.1. Avaliação energética - Parte A

4.1.1. Determinação da potência correspondente às correntes de saída

Potência térmica dos gases de combustão

A parte A do balanço contempla a chaminé 1 e 2 da máquina ZELL, cuja composição dos gases foi apresentada na tabela 3.14.

A potência térmica dos gases de combustão foi calculada através da equação 4.8.

$$H_g = \dot{m}_g \int_{298}^{T_g} c_{p_g} dT \quad (4.8)$$

Os caudais mássicos dos gases de combustão são os apresentados no capítulo 3, secção 3.4.8. Os caudais molares nas chaminé 1 e 2 são 0,0837 kmol/s e 0,219 kmol/s, respetivamente (tabela 3.15).

A entalpia específica dos gases foi determinada pela equação 4.9.

$$\int_{298}^T c_p dT = \int_{298}^T (a + bT + cT^2) dT = a(T - 298) + \frac{b}{2}(T^2 - 298^2) + \frac{c}{3}(T^3 - 298^3) \quad (4.9)$$

Na tabela 4.1 apresentam-se os valores das constantes necessárias ao cálculo da entalpia específica dos gases de combustão. [14]

Tabela 4.1- Valores das constantes necessárias ao cálculo do calor específico dos gases de combustão

Componente	Constante (cal/mol K)		
	a	b X 10 ²	c X 10 ⁵
O ₂	6,085	0,3631	-0,1709
CO ₂	5,316	1,4285	-0,8362
CO	6,726	0,04001	0,1283
NO ₂	5,48	1,365	-0,841
SO ₂	3,918	3,483	-2,675
N ₂	6,903	-0,03753	0,1930
H ₂ O	7,700	0,04594	0,2521

Na tabela 4.2 apresentam-se os valores da fração molar dos gases de combustão e os valores calculados para a entalpia específica dos gases na chaminé 1.

Tabela 4.2- Fração molar e entalpia específica dos gases de combustão na chaminé 1

Componente	y _i	$\int_{298}^{T_g} c_{p_i} dT$ (cal/mol)	$\int_{298}^{T_g} c_{p_i} dT \times \frac{4,18 J}{1 cal} \times y_i$ (kJ/kmol)
O ₂	0,193	837,76	675,85
CO ₂	9,0E-3	1092,35	41,09
CO	9,77E-6	822,88	0,0336
NO ₂	1,19E-5	1084,33	0,0539
SO ₂	3,42E-6	1509,85	0,0216
N ₂	0,737	820,95	2529,07
H ₂ O	0,061	957,89	244,24
$\sum y_i \int_{298}^{T_g} c_{p_i} dT$			3490,36

O exemplo de cálculo da entalpia específica de cada componente dos gases de combustão encontra-se no anexo B – B.4.

Multiplicando o caudal molar na chaminé 1 pela entalpia específica dos gases de combustão obteve-se uma potência térmica dos gases na chaminé 1 de 292,14 kW.

Na tabela 4.3 estão representados os valores da fração molar e os valores calculados para a entalpia específica dos gases na chaminé 2.

Tabela 4.3- Fração molar e entalpia específica dos gases de combustão na chaminé 2

Componente	y_i	$\int_{298}^{T_g} c_p \partial T$ (cal/mol)	$\int_{298}^{T_g} c_{p_i} \partial T \times \frac{4,18 J}{1 cal} \times y_i$ (kJ/kmol)
O ₂	0,192	1160,94	931,72
CO ₂	9,0E-3	1530,60	57,58
CO	6,46E-5	1137,31	0,307
NO ₂	1,47E-5	1517,19	0,0932
SO ₂	3,53E-6	2126,99	0,0314
N ₂	0,751	1133,70	3558,89
H ₂ O	0,048	1326,72	266,19
$\sum y_i \int_{298}^{T_g} c_{p_i} \partial T$			4814,81

O exemplo de cálculo da entalpia específica de cada componente dos gases de combustão encontra-se no anexo B – B.4.

Multiplicando o caudal molar na chaminé 2 pela entalpia específica dos gases de combustão obteve-se uma potência térmica dos gases na chaminé 2 de 1054,44 kW.

A potência térmica total correspondente aos gases de combustão e dada pelas chaminés 1 e 2 é de 1346,58 kW.

Potência térmica da tela pré-impregnada A

A potência térmica da tela pré-impregnada calculou-se pela equação 4.10.

$$H_t = \dot{m}_t c_{p_t} (T_t - 298) \quad (4.10)$$

O caudal mássico da tela pré-impregnada é 0,687 kg/s e foi determinado sabendo o peso, comprimento e velocidade da tela presentes na tabela 3.12. Na estufa 4 a temperatura é mantida a 250°C, no entanto, à saída dessa estufa a tela encontra-se a 242 °C, valor medido no painel de controlo da máquina e, o calor específico da tela é de 1,30 kJ/ (kg. °C). [15]

Aplicando a equação 4.10 obteve-se a potência térmica da tela pré-impregnada que tem o valor de 193,80 kW.

Potência térmica da água de saída

A potência térmica da água determinou-se pela equação 4.11.

$$H_{\text{água}} = \dot{m}_{\text{água}} c_{p\text{água}} (T_{a,s} - 298) \quad (4.11)$$

Com o valor da massa volúmica da água a 25°C (Anexo A) e o caudal volumétrico da tabela 3.13 determinou-se o caudal mássico de água. O valor obtido foi de 0,0979 kg/s.

A temperatura da água de arrefecimento à saída da máquina é 40 °C. Este valor foi obtido em trabalhos já realizados na empresa à máquina ZELL. [12] O calor específico da água foi calculado, conforme o anexo A, para a temperatura média e tem o valor de 4,17 kJ/(kg. K).

Aplicando a equação 4.11 determinou-se a potência térmica da água de arrefecimento à saída da ZELL obtendo-se 6,12 kW.

4.1.2. Determinação da potência correspondente às correntes de entrada

Potência térmica do gás natural

A potência do gás natural calculou-se pela equação 4.12.

$$H_{\text{gás}} = \dot{m}_{\text{gás}} \int_{298}^{T_{\text{gás}}} c_{p\text{gás}} dT \quad (4.12)$$

Recordando que as estufas 1, 2, 3 e 4 incorporam esta parte da análise energética e consultando a tabela 3.6 que consta no capítulo 3 foi possível obter o caudal volumétrico médio gasto de gás natural de 3,61 m³/min. Este valor foi obtido considerando o artigo P3 e a soma dos caudais correspondentes às referidas estufas.

Para determinar o caudal mássico de gás natural foi necessário conhecer a massa volúmica do gás natural fornecido à empresa. O valor da massa volúmica é 0,8141 kg/m³. [10] Desta forma, foi possível obter o caudal mássico de gás natural nas quatro primeiras estufas de 0,049 kg/s.

Para obter o caudal molar de gás natural foi necessário conhecer a massa molar média do gás natural, tendo em conta a sua composição. A massa molar é de 18,19 g/mol (Anexo A) e o caudal molar calculado foi de 2,69E-3 kmol/s.

A entalpia específica do gás natural calculou-se pela equação 4.9. Na tabela 4.4 estão apresentados os valores das constantes necessárias ao cálculo da entalpia específica do gás natural. [14]

Tabela 4.4 – Valores das constantes para o cálculo da entalpia específica do gás natural

Componente	Constante (cal/mol. K)		
	a	b X 10 ²	c X 10 ⁵
CH ₄	4,750	1,200	0,3030
C ₂ H ₆	1,648	4,124	-1,530
C ₃ H ₈	-0,966	7,279	-3,755
N ₂	6,903	-0,03753	0,1930
CO ₂	5,316	1,4285	-0,8362

Na tabela 4.5 estão representados os valores da composição molar, apresentados também no levantamento energético (tabela 3.5), e os valores calculados para a entalpia específica do gás natural. A temperatura do gás natural admitido é 24°C.

Tabela 4.5 – Valores da fração molar e da entalpia específica do gás natural

Componente	y _i	$\int_{298}^{T \text{ gás}} cp \, dT$ (cal/mol)	$\int_{298}^{T \text{ gás}} cp \, dT \times \frac{4,18 \text{ J}}{1 \text{ cal}} \times y_i$ (kJ/kmol)
CH ₄	0,8789	-8,59	-31,56
C ₂ H ₆	0,0806	-12,56	-4,23
C ₃ H ₈	0,0138	-17,37	-1,00
N ₂	0,0109	-6,96	-0,317
CO ₂	0,0127	-8,82	-0,468
$\sum y_i \int_{298}^{T \text{ gás}} cp_i \, dT$			-37,58

O exemplo de cálculo da entalpia específica de cada componente do gás natural encontra-se no anexo B – B.4.

Aplicando a equação 4.12 o valor da potência térmica é de -0,101 kW.

Potência térmica do ar de combustão

A potência térmica do ar de combustão foi determinada pela equação 4.13.

$$H_q = \dot{m}_q \int_{298}^{T_q} c_{p_q} dT \quad (4.13)$$

O caudal mássico de ar de combustão que entra nos queimadores das quatro primeiras estufas é de 3,05 kg/s, como se pode verificar pela tabela 3.9. Este valor foi obtido considerando o artigo P3 e a soma dos caudais das estufas 1 a 4.

Na tabela 4.6 estão apresentados os valores das constantes necessárias ao cálculo da entalpia específica do ar. [14]

Tabela 4.6 – Valores das constantes necessárias ao cálculo da entalpia específica do ar

Componente	Constante (cal/mol. K)		
	a	b X 10 ²	c X 10 ⁵
Ar	6,713	0,04697	0,1147

A temperatura do ar à entrada dos queimadores é de 24°C. A entalpia específica do ar de combustão foi calculada pela equação 4.9 e com os valores das constantes da tabela 4.6. O valor obtido foi de -1,01 kJ/kg (Anexo B – B.5).

Aplicando a equação 4.13 obtém-se o valor da potência térmica do ar de combustão de -3,08 kW.

Potência térmica do ar fresco

A potência térmica do ar fresco foi determinada pela equação 4.14.

$$H_f = \dot{m}_f \int_{298}^{T_f} c_{p_f} dT \quad (4.14)$$

O ar fresco corresponde ao ar que entra junto com a entrada e saída da tela na parte inferior de cada estufa. As estufas 1 e 2 iniciam-se no piso 1 enquanto as estufas 3 e 4 começam no piso 2. Desta forma as temperaturas de entrada do ar diferem.

Os caudais mássicos de ar fresco admitidos na entrada e saída dos orifícios das quatro primeiras estufas estão representados na tabela 3.11. O caudal de ar fresco para a estufa 1 e 2 é de 11,02 kg/s e para a estufa 3 e 4 é de 8,19 kg/s. Os caudais de ar fresco correspondem à soma dos caudais mássicos das estufas correspondentes quer para a entrada quer para a saída da tela.

A temperatura do ar para o artigo em poliéster estudado é de 23°C no piso 1 e 22°C no piso 2. Os valores das entalpias específicas do ar no piso 1 e 2 são -2,01 kJ/kg e -3,02

kJ/kg, respetivamente. Estes valores foram calculados pela equação 4.9 e com os valores das constantes da tabela 4.6 e conforme o anexo B- B.5.

A potência térmica foi determinada pela equação 4.14. O valor total obtido foi -46,88 kW.

Potência térmica da solução de ativação

A solução de ativação é a solução da tina 1 em que a tela mergulha antes de entrar na primeira estufa.

A potência térmica da solução de ativação foi determinada pela equação 4.15.

$$H_{solução} = \dot{m}_{solução} cp_{solução} (T_{solução} - 298) \quad (4.15)$$

O caudal mássico médio da solução é 0,154 kg/s (tabela 3.17). A temperatura da solução é de 23°C correspondendo ao calor específico de 4,18 kJ/ (kg. K) (anexo A).

O valor da potência térmica da solução de ativação foi determinada pela equação 4.15. O valor obtido foi de -1,29 kW.

Potência térmica da tela verde

A potência térmica da tela verde calculou-se pela equação 4.10.

O caudal mássico da tela verde é de 0,663 kg/s e foi determinado sabendo o peso, comprimento e velocidade da tela, valores apresentados na tabela 3.12. A temperatura da tela verde é de 23°C e o calor específico da tela é de 1,30 kJ/ (kg. °C) [15].

O valor obtido para a potência térmica da tela verde é de -1,72 kW.

Potência térmica da água de entrada

A potência térmica da água à entrada da ZELL determinou-se pela equação 4.16.

$$H_{água} = \dot{m}_{água} cp_{água} (T_{a,e} - 298) \quad (4.16)$$

O caudal mássico da água é de 0,0979 kg/s. A temperatura da água de arrefecimento à entrada da máquina é de 31 °C (tabela 3.13). O calor específico da água determinado conforme o anexo A, para a temperatura média, tem o valor de 4,17 kJ/ (kg. K).

O valor obtido para a potência térmica da água de arrefecimento à entrada da ZELL foi de 2,45 kW.

Na tabela 4.7 apresentam-se os valores obtidos para as potências das correntes de saída e entrada envolvidas na parte A da análise energética.

Tabela 4.7 – Valores das potências das correntes de entrada e saída da parte A

Correntes		Potência (kW)
Saídas	Gases de combustão	1346,58
	Tela pré-impregnada A	193,80
	Água de saída	6,12
$\sum H_s$		1546,5
Entradas	Gás natural	-0,101
	Ar combustão	-3,08
	Ar fresco	-46,88
	Solução ativação	-1,29
	Tela verde	-1,72
	Água de entrada	2,45
$\sum H_e$		-50,62

O calor da reação de combustão foi calculado pela equação 4.17.

$$-\Delta H_{\text{reação}}^0 = V_{\text{gás}} \times PCI \quad (4.17)$$

O caudal volumétrico de gás natural nas quatro primeiras estufas é de 3,61 m³/min (tabela 3.6) e o valor do PCI é 10,66 kWh/m³ (Anexo A). [10] O calor da reação de combustão obtido é de -2308,96 kW.

Pelo balanço de energia descrito na equação 4.7 determinou-se a potência térmica perdida pela máquina ZELL na parte A, $q_A = -711,84$ kW.

4.2. Avaliação energética - Parte B

4.2.1. Determinação da potência correspondente às correntes de saída

Potência térmica dos gases de combustão

Na análise energética à parte B os gases de combustão das estufas 5, 6 e 7 saem pela chaminé 3.

A potência térmica dos gases de combustão foi calculada pela equação 4.8.

O caudal mássico dos gases de combustão nas estufas 5, 6 e 7 encontra-se no capítulo 3, secção 3.4.8. Sendo a massa molecular dos gases na chaminé 3 de 28,7 g/mol o caudal molar é de 0,158 kmol/s.

A entalpia específica dos gases foi determinada com os valores presentes na tabela 4.1 e pela equação 4.9.

Na tabela 4.8 apresentam-se os valores da fração molar dos gases de combustão e os valores calculados para a entalpia específica dos gases na chaminé 3.

Tabela 4.8 – Frações molares e valores calculados para a entalpia específica dos gases na chaminé 3

Componente	y_i	$\int_{298}^{T_g} c_{p_i} \partial T$ (cal/mol)	$\int_{298}^{T_g} c_{p_i} \partial T \times \frac{4,18}{1 \text{ cal}} \times y_i$ (kJ/kmol)
O₂	0,192	1101,87	884,32
CO₂	9,0E-3	1449,93	54,55
CO	3,2E-5	1079,92	0,144
NO₂	9,5E-6	1437,59	0,0571
SO₂	3,3E-6	2013,17	0,0278
N₂	0,776	1076,65	3492,31
H₂O	0,023	1259,27	121,07
$\sum y_i \int_{298}^{T_g} c_{p_i} \partial T$			4552,48

A entalpia específica de cada componente dos gases de combustão foi determinada conforme o anexo B- B.4. A potência térmica dos gases de combustão na chaminé 3 é de 719,29 kW.

Potência térmica da tela impregnada

A potência térmica da tela impregnada calculou-se pela equação 4.10.

Sabendo o valor do peso, comprimento e velocidade da tela (tabela 3.12) calculou-se o caudal mássico da tela impregnada obtendo-se 0,687 kg/s. A temperatura da tela à saída da estufa 7 é 244°C, ligeiramente inferior à temperatura referida na tabela 3.4, 250 °C que corresponde ao interior das estufas. Este valor foi retirado do painel da máquina e o calor específico da tela é de 1,30 kJ/ (kg. °C) [15].

A potência térmica da tela impregnada é de 195,59 kW.

Potência térmica da água de saída

A água de arrefecimento da análise energética à parte B é a mesma que na parte A. Desta forma, a potência térmica da água de saída é 6,12 kW.

4.2.2. Determinação da potência correspondente às correntes de entrada

Potência térmica do gás natural

A potência do gás natural calculou-se pela equação 4.12.

O caudal volumétrico de gás natural necessário para a combustão nas estufas 5, 6 e 7 é de 2,32 m³/min e encontra-se na tabela 3.6. Este valor foi obtido considerando o artigo P3 e a soma dos caudais correspondentes às referidas estufas.

Para determinar o caudal mássico de gás natural foi necessário conhecer a massa volúmica do gás natural fornecido à empresa (Anexo A). O caudal mássico de gás natural nestas estufas é de 0,0315 kg/s.

O caudal molar de gás natural foi determinado à custa da massa molar média do gás natural (18,19 g/mol). O valor obtido foi de 1,73E-3 kmol/s.

Com o valor da entalpia específica do gás natural que consta na tabela 4.5 e o caudal molar obteve-se o valor da potência térmica do gás natural. O valor obtido é de -0,065 kW.

Potência térmica do ar de combustão

A potência térmica do ar de combustão foi determinada pela equação 4.13.

O caudal mássico de ar de combustão que entra nos queimadores das estufas 5, 6 e 7 é de 2,37 kg/s (tabela 3.9). Este valor foi obtido com a soma dos caudais correspondentes às referidas estufas.

O calor específico do ar é de -1,01 kJ/kg (anexo B – B.5) e foi calculado pela equação 4.9 e pelas constantes apresentadas na tabela 4.6.

Aplicando a equação 4.13 obteve-se o valor da potência térmica do ar de combustão de -2,39 kW.

Potência térmica do ar fresco

A potência térmica do ar fresco determinou-se pela equação 4.14.

As estufas 5, 6 e 7 iniciam-se no piso 2 e a temperatura do ar fresco é de 22°C. Os caudais mássicos de ar fresco na entrada e saída da tela pelos orifícios das estufas estão representados na tabela 3.11. O caudal de ar fresco é 9,25 kg/s e corresponde à soma dos caudais mássicos quer para a entrada quer para a saída da tela das estufas referidas.

A entalpia específica foi calculada pela equação 4.9 e com os valores das constantes da tabela 4.6. O valor obtido é de -3,02 kJ/kg (anexo B - B.5).

Aplicando a equação 4.14 determinou-se a potência térmica do ar fresco, obtendo-se o valor de -27,94 kW.

Potência térmica da solução de impregnação

A solução de impregnação é a solução que se encontra na tina 2 à temperatura exterior do piso 0 de 24°C. Este valor encontra-se na tabela 3.10 e foi lida para o artigo P3. O caudal mássico da solução de impregnação é de 0,062 kg/s e o calor específico de 3,65 kJ/kg. °C, conforme indicado no capítulo 3 na secção 3.4.10.

A potência térmica da solução é de -0,453 kW.

Potência térmica da tela pré-impregnada B

O caudal mássico da tela pré-impregnada é de 0,687 kg/s e foi determinado sabendo o peso, comprimento e velocidade da tela presentes na tabela 3.12. A temperatura da tela é de 23 °C e o calor específico da tela é de 1,30 kJ/kg. °C. [15]

A potência térmica da tela pré-impregnada B é de -1,79 kW.

Potência térmica da água de entrada

A água de arrefecimento de entrada da análise energética à parte B é a mesma que na parte A. Desta forma, a potência térmica da água é de 2,45 kW.

Na tabela 4.9 apresentam-se os valores obtidos para as potências das correntes de saída e entrada envolvidas na parte B da análise energética.

Tabela 4.9 – Valores das potências das correntes de entrada e saída da parte B

Correntes		Potência (kW)
Saídas	Gases de combustão	719,29
	Tela impregnada	195,59
	Água de saída	6,12
$\sum H_s$		921
Entradas	Gás natural	-0,065
	Ar combustão	-2,39
	Ar fresco	-27,94
	Solução impregnação	-0,453
	Tela pré-impregnada B	-1,79
	Água de entrada	2,45
$\sum H_e$		-30,19

O calor da reação de combustão foi calculado pela equação 4.17.

O caudal volumétrico de gás natural nas estufas é 2,32 m³/min (tabela 3.6) e o valor do PCI é 10,66 kWh/m³. [10] O calor da reação de combustão obtido é de -1483,87 kW.

Pelo balanço de energia descrito na equação 4.7 determinou-se a potência térmica perdida pela máquina na parte B, $q_B = -532,68$ kW.

5. Otimização energética da máquina ZELL

De acordo com os objetivos do trabalho pretendeu-se otimizar a máquina ZELL tendo em conta o consumo das várias utilidades nomeadamente, a eletricidade e o gás natural.

Segundo o levantamento energético efetuado no capítulo 3 verificou-se que na máquina ZELL a fatura energética corresponde a 47% de gás natural e apenas 7% em energia elétrica. Por isso, as medidas de otimização a avaliar serão feitas no sentido da diminuição do consumo de gás natural.

De acordo com o capítulo 4, a análise energética foi avaliada em duas partes. Uma parte A onde se incluíram as quatro primeiras estufas e uma parte B com as restantes três estufas. Verificou-se que a potência perdida na zona correspondente à parte A foi de 712 kW e na parte B foi 533 kW.

Analisando o conteúdo entálpico das várias correntes presentes no balanço de energia (equação 4.7), verifica-se que:

- As entalpias correspondentes aos gases de combustão são muito elevadas o que constituiu uma fonte de energia que possivelmente pode ser aproveitada;
- Se as temperaturas das correntes de entrada forem aumentadas relativamente ao estado de referência o consumo de gás natural vem com certeza diminuído.

Uma vez que as perdas térmicas determinadas são praticamente constantes para cada artigo produzido porque as condições de operação são fixas, então a diminuição do caudal de gás pode ser conseguida tendo em conta os fatores acima mencionados.

A diminuição do caudal de exaustão já foi avaliada num trabalho anterior [11] e, portanto neste capítulo estudou-se a possibilidade de aproveitar o conteúdo energético dos gases de combustão para pré-aquecer o ar fresco e/ou ar de combustão. Foi também avaliada a influência da diminuição do caudal de água de arrefecimento que circula nos rolos relativamente ao consumo de gás natural. Este estudo será realizado à parte A do balanço de energia, no entanto sugere-se o mesmo estudo de otimização à parte B.

5.1. Aproveitamento energético dos gases de combustão

O aproveitamento energético dos gases de combustão pode ser efetuado para pré-aquecer o ar fresco ou o ar de combustão. Para isso, estudou-se a alteração obtida no consumo de gás natural aumentando a temperatura de entrada do ar fresco e do ar de combustão (Anexo B – B.6). Esta análise torna-se mais evidente através da figura 5.1.

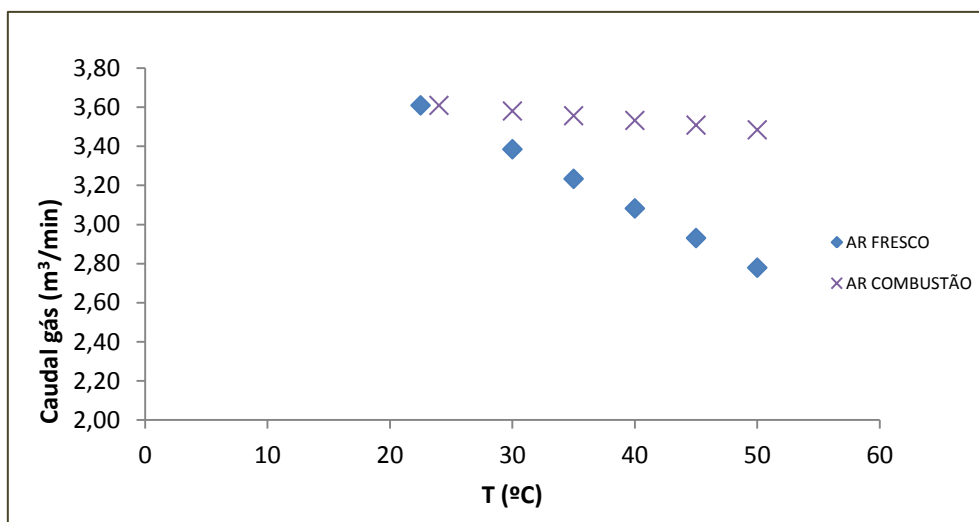


Figura 5.1 - Análise do consumo de gás com o aumento da temperatura do ar

Analisando a figura 5.1, verifica-se que a corrente cujo pré-aquecimento terá maior impacto na poupança de gás natural será a correspondente ao ar fresco. Porém, a injeção do ar pré-aquecido nos orifícios de entrada e saída da tela das estufas não é uma questão fácil de implementar em termos logísticos, no entanto fez-se também essa análise.

Tendo em conta o gasto atual de gás natural e a respetiva medida de otimização calculou-se a poupança anual de gás consumido considerando o tempo de funcionamento da máquina ZELL, referido no capítulo 2, e que corresponde a 8447 horas por ano. Estes cálculos apresentam-se no anexo B – B.6.3. Na figura 5.2 constam os valores obtidos para cada temperatura imposta.

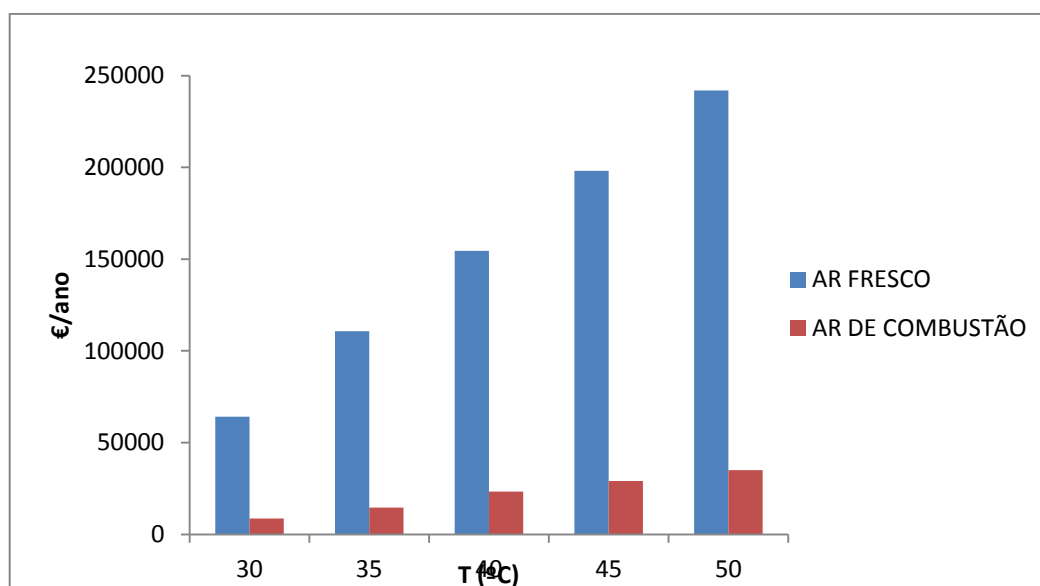


Figura 5.2 – Valores da poupança anual de gás natural

Analisando a figura 5.2 verifica-se que à medida que a temperatura imposta aumenta, a poupança anual de gás natural também aumenta. Pode-se ainda aferir que o pré-aquecimento do ar fresco traduz-se numa poupança anual muito maior.

O pré-aquecimento do ar fresco e do ar de combustão pode ser conseguido através da instalação de um permutador de calor de fluxo cruzado (figura 5.3) que aproveitará a potência dos gases de combustão. Para projetar este tipo de permutador foi necessário estimar a potência térmica referida para o pré-aquecimento do ar fresco e/ou do ar de combustão. Para isso, e de acordo com os caudais de ar fresco e ar de combustão necessários impôs-se uma temperatura de entrada para ambas as correntes de 40°C e 50°C.

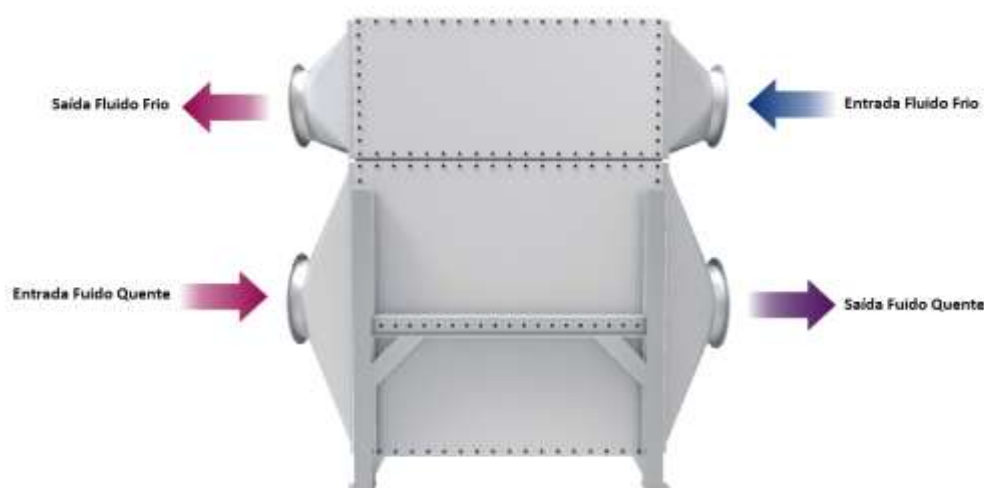


Figura 5.3 – Esquema representativo do permutador de fluxo cruzado

Projeto do permutador de fluxo cruzado para pré-aquecer o ar fresco

Para projetar o permutador foi necessário conhecer o caudal mássico e as temperaturas de entrada e saída de cada fluido. Admitiu-se como fluido frio o ar fresco e como fluido quente os gases de combustão que saem da chaminé 1 e 2.

Desta forma, estudaram-se três casos diferentes para o fluido frio. O caso 1 utiliza o caudal total de ar fresco que entra nas estufas 1 a 4, o caso 2 usa apenas o caudal de ar correspondente às estufas 1 e 2 e, por último o caso 3 onde se avalia o pré-aquecimento do caudal de ar das estufas 3 e 4. Estes caudais totais são determinados à custa dos valores apresentados na tabela 3.11. Neste trabalho são mencionados os caudais de ar fresco admitido em cada estufa, pelas ranhuras correspondentes à entrada e saída da tela. Para isso, dispõe-se dos gases de combustão provenientes da chaminé 1 e 2, cujo caudal total é

de 8,58 kg/s (tabela 3.15). Considerando que a temperatura média da corrente quente é de 437 K, ou seja, 164°C. Este valor foi obtido tendo em conta os valores das temperaturas dos gases de combustão das chaminés 1 e 2 apresentados na tabela 3.14.

Na tabela 5.1 apresentam-se os valores das potências necessárias para pré-aquecer o ar para as duas temperaturas impostas escolhidas. O exemplo de cálculo da potência necessária ao aquecimento do fluido frio encontra-se no anexo B - B.7.

Tabela 5.1 – Caudal mássico, temperaturas e potência do fluido frio para as temperaturas impostas

Caso	\dot{m}_f (kg/s)	T_{fe} (°C)	T_{fs} (°C)	q_f (kW)	
1 – A	19,21	23	40	328	
1 – B			50	522	
2 – A	11,02		40	188	
2 – B			50	299	
3 – A	8,19		40	140	
3 – B			50	222	

Com os valores mencionados na tabela 5.1 para cada caso em estudo fez-se um pedido de orçamento à *Spirax Sarco*, que para além do investimento do permutador forneceu o período de retorno e a poupança anual. Na tabela 5.2 apresentam-se o valor do investimento do equipamento, o período de retorno do mesmo e, a poupança anual de energia.

Tabela 5.2 – Valores do investimento, período de retorno e poupança anual para o ar fresco

Caso	Investimento (€)	Período de retorno (meses)	Poupança anual (kWh)
1 – A	153.157	39	2.163.396
1 – B	171.976	38	2.370.114
2 – A	102.938	36	1.359.639
2 – B	152.913	39	2.159.426
3 – A	116.811	38	1.604.873
3 – B	116,811	38	1.604.873

O período de retorno do investimento para todos os casos ronda os três anos, logo podemos considerar o investimento viável.

Uma vez que a introdução do ar pré-aquecido nas zonas correspondentes à entrada e saída da tela das estufas não é de fácil aplicação poderá ser feito uma insuflação desse ar quente junto a essas aberturas. Para isso, seria necessário usar condutas de escoamento

de ar que permitissem o aquecimento de uma zona limitada da máquina ZELL correspondente à entrada e saída da tela.

Projeto do permutador de fluxo cruzado para pré-aquecer o ar de combustão

Para projetar o permutador necessário ao pré-aquecimento do ar de combustão foi necessário conhecer o caudal mássico e as temperaturas de entrada e saída de cada fluido. Admitiu-se como fluido frio o ar de combustão na entrada dos queimadores das estufas 1 a 4 e como fluido quente os gases de combustão que saem da chaminé 1 e 2.

Desta forma, estudou-se o pré-aquecimento de 3,05 kg/s de ar de combustão de 24°C para 40°C e de 24°C para 50°C, dispondo para isso de gases de combustão a 164°C e a um caudal de 8,58 kg/s.

Na tabela 5.3 apresentam-se os valores das potências necessárias para pré aquecer o ar para as duas temperaturas impostas escolhidas.

Tabela 5.3 – Valores das potências térmicas necessárias ao pré aquecimento do ar de combustão

Caso	\dot{m}_f (kg/s)	T_{fe} (°C)	T_{fs} (°C)	q_f (kW)
1	3,05	24	40	49
2			50	80

O valor do investimento do equipamento, o período de retorno do mesmo e, a poupança anual de energia para os casos referidos são os que se apresentam na tabela 5.4 e foram fornecidos pela *Spirax Sarco*.

Tabela 5.4 – Valores do investimento, período de retorno e poupança anual para o ar de combustão

Caso	Investimento (€)	Período de retorno (meses)	Poupança anual (kWh)
1	29.899	34	393.523
2	48.585	35	639.475

Através da análise dos valores obtidos para o período de retorno do investimento verifica-se que sendo esse período inferior a três anos, o projeto é viável de concretização.

5.2. Redução do caudal de água de arrefecimento

A água de arrefecimento entra na ZELL a 31°C e volta à torre de arrefecimento a 40°C. Em trabalhos já realizados ao sistema de arrefecimento dos rolos da máquina ZELL foi possível verificar que se pode diminuir em 25% o caudal atual de água. [12]

Considerando o caudal de água de arrefecimento correspondente à tela P3 de 0,0059 m³/min, apresentado na tabela 3.13 e, diminuindo este caudal em 25% obtém-se o valor de 0,0044m³/min. Esta redução no caudal de água de arrefecimento traduz-se numa poupança anual de gás natural de 419€.

6. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

No levantamento energético realizado à máquina ZELL foi possível recolher os dados necessários à otimização energética. A análise energética foi efetuada com base no artigo P3, que corresponde ao artigo mais produzido em poliéster. A utilidade com maior consumo no processo de impregnação é o gás natural representando 47% na fatura total da empresa e, é utilizado nos queimadores da máquina ZELL para a impregnação das telas e corresponde a 68% do consumo de energia nesta máquina.

Uma vez que a tela verde não percorre as estufas seguidamente até chegar ao produto final, a avaliação energética foi dividida em duas partes (parte A e parte B). O balanço de energia à parte A inclui as primeiras 4 estufas. A tela pré-impregnada A que sai da estufa 4 a cerca de 240°C passa por uma zona aberta e vai novamente mergulhar numa solução a 23°C antes de entrar na parte B, onde foi feito o segundo balanço de energia. Nesta zona intermédia as perdas térmicas, cerca de 190 kW, correspondem ao abaixamento da temperatura da tela necessário no processo de produção da tela impregnada. Estas perdas térmicas não se traduzem por isso num maior consumo de gás natural. A determinação da potência perdida pelo balanço energético na parte A e na parte B foi 712 kW e 533 kW, respetivamente.

Face à quantidade de calor perdida em ambas as partes do balanço de energia verificou-se que era necessário atuar no sentido de reduzir os consumos energéticos da máquina ZELL e, com isso, obter um uso mais eficiente de energia.

As medidas de otimização sugeridas e estudadas no presente trabalho, tendo em conta a energia perdida na parte A foram o aproveitamento energético dos gases de combustão e a redução do caudal de água de arrefecimento.

O aproveitamento energético dos gases de combustão pode ser efetuado para pré-aquecer o ar fresco ou o ar de combustão. Desta forma, estudou-se a alteração obtida no consumo de gás natural aumentando a temperatura de entrada do ar fresco e do ar de combustão e verificou-se que o caudal de gás consumido diminuía com o aumento dessa temperatura. Logo haveria uma poupança energética para a empresa.

O pré-aquecimento quer do ar fresco quer do ar de combustão pode ser conseguido através da instalação de permutadores de calor de fluxo cruzado que aproveitam a potência dos gases de combustão. Escolheu-se a temperatura de 40°C e 50°C como sendo a temperatura de entrada do ar nas estufas. Para cada uma delas determinou-se o calor necessário a transferir no permutador sabendo o caudal mássico do ar e as temperaturas envolvidas. Para isso, dispõe-se dos gases de combustão a 8,58 kg/s e 164°C.

O pré-aquecimento do ar fresco foi o que evidenciou uma poupança energética anual maior. No entanto, a injeção do ar pré-aquecido nos orifícios de entrada e saída da tela das estufas não é uma questão fácil em termos logísticos, pelo que se sugere aquecer as zonas restritas à máquina ZELL correspondentes à entrada e saída da tela. Deste modo o ar quente mantido nessas zonas vai permitir poupança de gás natural.

Para as condições referidas foram efetuados pedidos de orçamentos de permutadores de calor e verificou-se que o projeto é viável, uma vez que o período de retorno do investimento é cerca de três anos, com uma poupança anual entre 1.359.639 kWh e 2.370.114 kWh, para o ar fresco e 393.523 kWh e 639.475 kWh para o ar de combustão.

Com a redução do caudal de água em 25%, valor referido em estudos já efetuados ao sistema de arrefecimento dos rolos, obteve-se uma poupança anual de 419 €. Isto evidencia que não será o caudal de água a causa principal do grande consumo de gás. Aumentar a temperatura da água também não seria uma boa medida pois poderia causar problemas de corrosão nos tubos.

Como sugestões para trabalhos futuros sugere-se a avaliação das medidas de otimização para a energia perdida na parte B e a avaliação e otimização do gasto de ar comprimido, outra utilidade com bastante impacto na fatura energética correspondente à da máquina ZELL.

Bibliografia

- [1] http://www.inovenergy.inovcluster.pt/media/28452/Estado_da_arte_do_setor_do_frio_por_fileira.pdf (ficheiro pdf descarregado a 10 março de 2015)
- [2] Magalhães, Eduardo. *Otimização da Distribuição de Vapor e Energia Elétrica de uma Indústria Petroquímica*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio do Sul, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Química. Porto Alegre, 2006.
- [3] <http://restosdecoleccion.blogspot.pt/2013/02/industria-textil-do-ave-sa.html>, acedido a 4 março de 2015
- [4] Auditoria Energética – Auditoria Energética e Plano de Racionalização de Energia, Período de 2011 a 2016, Ano referência 2010. Indústria Têxtil do Ave, S.A - Lousado. Auditene, Vila Nova de Famalicão, janeiro de 2012
- [5] <http://www.ipressjournal.pt/continental-textil-do-ave-superou-producao-e-vendas-em-2013/>, acedido a 9 março de 2015
- [6] <http://www.cofely-gdfsuez.pt/empresa/perfil>, acedido a 9 março de 2015
- [7] Amorim da Silva, Sara. *Aproveitamento sustentável da borracha proveniente dos pneus usados*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica – Secção de materiais e processos tecnológicos, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia do Porto. Julho de 2011
- [8] Vieira, Hugo. *Levantamento elétrico e análise de equipamento para acabamento térmico e químico de telas para pneus*. Tese de Mestrado, Engenharia Eletrotécnica Sistema Elétricos de Energia, Instituto Superior de Engenharia do Porto. Setembro de 2013
- [9] Site do Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia, http://www2.adene.pt/pt-pt/SubPortais/SGCIE/layouts/SGCIE_ExternalEntities/ConversorSGCIE.aspx, acedido a 4 setembro de 2015
- [10] Site da GALP, <http://galpgasnaturaldistribuicao.pt/gas-natural/o-que-e>, acedido a 14 setembro de 2015
- [11] Torrinha, Álvaro. *Auditoria energética à Indústria Têxtil d Ave*. Tese de Mestrado, Engenharia Química, Instituto Superior de Engenharia do Porto. Outubro de 2011
- [12] Maia, Joana. *Otimização energética do Sistema de Refrigeração da máquina de impregnar ZELL*. Tese de Mestrado, Mestrado em Otimização Energética da Indústria Química, Instituto Superior de Engenharia do Porto. Outubro de 2014
- [13] Relatório de análise aos gases de combustão das chaminés da ZELL realizado pela SONДАР em 2013 acreditados pela IPAC.
- [14] Himmeblau, David, M.; *Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering*; 3ª edição; Prentice-Hall inc.

[15] PERRY, Robert H.; GREEN, Don W.; *Perry's Chemical Engineer's Handbook*, 8th edition, Poling, B. E.; Thomson, G. H.; Friend, D. G.; Rowley, R. L.; Wilding, W. V.; McGraw-Hill; 2008.

[16] GEANKOPLIS, C. J., *Transport Processes and Units Operations*; 3th edition; Prentice-Hall International; 1993.

ANEXOS

Anexo A - Propriedades físicas

A.1. Gás natural

Na tabela A.1 encontram-se os valores da percentagem volumétrica do gás natural usado nos queimadores [10].

Tabela A.1 - Composição volumétrica dos componentes do gás natural

Componente	% (v/v)
CH ₄	87,885
C ₂ H ₆	8,056
C ₃ H ₈	1,378
N ₂	1,088
CO ₂	1,266
OUTROS	0,327

A massa volúmica do gás natural é 0,8141 kg/m³, o PCS é 11,8 kWh/m³ e o PCI é 10,66 kWh/m³. [10]

A.2. Ar

Na tabela A.2 apresentam-se os valores de temperatura e massa volúmica do ar. [16]

Tabela A.2 - Valores de temperatura e massa volúmica do ar

T (°C)	ρ (kg/m ³)
0	1,293
10	1,246
37,8	1,137
65,6	1,043
93,3	0,964
121,1	0,895
148,9	0,838
176,7	0,785
204,4	0,74
232,2	0,7
260	0,662

Com valores de temperatura e de massa volúmica do ar da tabela A.1 fez-se uma representação gráfica de forma a chegar a uma expressão que permitisse determinar a massa volúmica para uma dada temperatura (figura A.1).

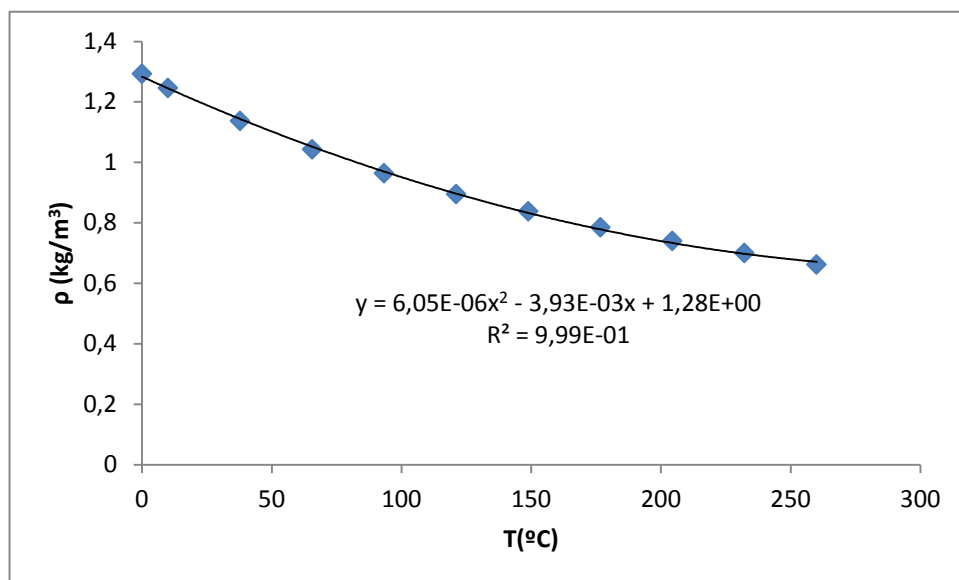


Figura A.1 - Representação gráfica da massa volúmica versus temperatura para o ar

Na tabela A.3 apresentam-se valores de temperatura e capacidade calorífica do ar.

[16]

Tabela A.3 – Valores da capacidade calorífica do ar

T ($^{\circ}\text{C}$)	cp (kJ/kg. K)
10	1,0048
37,8	1,0048
65,6	1,009
121,1	1,0132
148,9	1,0174
176,7	1,0216

Para determinar alguma temperatura que não conste na tabela A.3 foi necessário fazer uma interpolação entre duas temperaturas.

A.3. Água

Na tabela A.4 apresentam-se valores de temperatura e massa volúmica da água líquida. [16]

Tabela A.4 – Valores de temperatura e massa volúmica da água líquida

T (°C)	ρ (kg/m ³)
0	999,87
4	1000,00
10	999,73
20	998,23
25	997,08
30	995,68
40	992,25
50	988,07
60	983,24
70	977,81
80	971,83
90	965,34
100	958,38

Com os valores de temperatura e de massa volúmica da água líquida da tabela A.2 fez-se uma representação gráfica de forma a chegar a uma expressão que permita determinar a massa volúmica para uma dada temperatura (figura A.2).

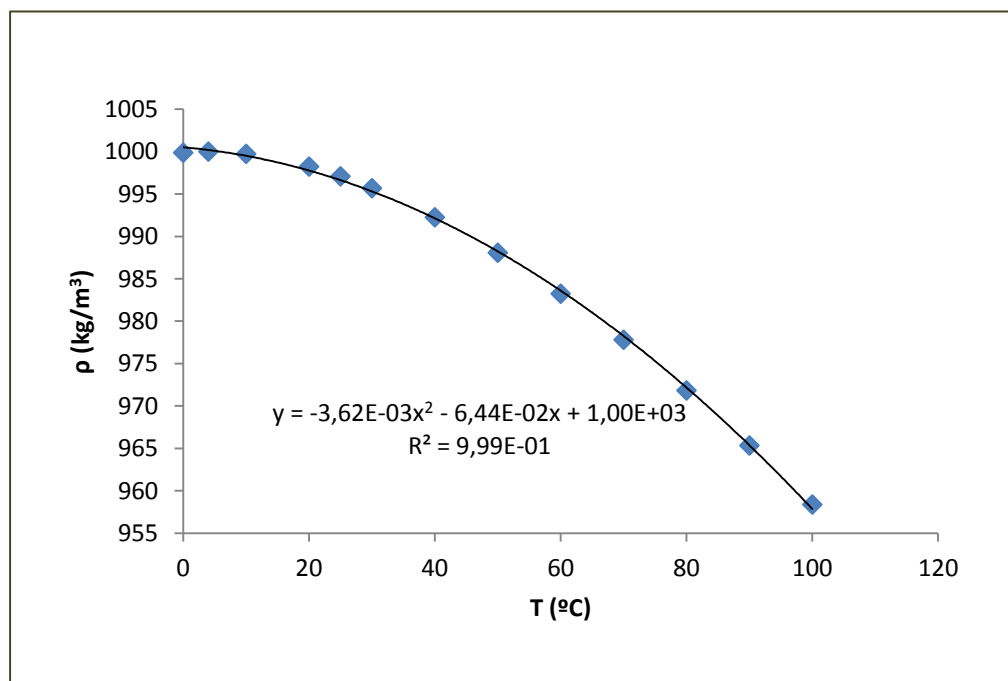


Figura A.2 - Representação gráfica da massa volúmica versus temperatura para a água líquida

Na tabela A.5 apresentam-se valores de temperatura e capacidade calorífica da água líquida. [16]

Tabela A.5 - Valores de temperatura e capacidade calorífica da água líquida

T (°C)	cp (kJ/kg. K)
0	4,220
10	4,195
20	4,185
25	4,182
30	4,181
40	4,181
50	4,183
60	4,187
70	4,192
80	4,199
90	4,208
100	4,219

Com os valores de temperatura e da capacidade calorífica da água líquida da tabela A.3 fez-se uma representação gráfica de forma a chegar a uma expressão que permita determinar a capacidade calorífica para uma dada temperatura (figura A.3).

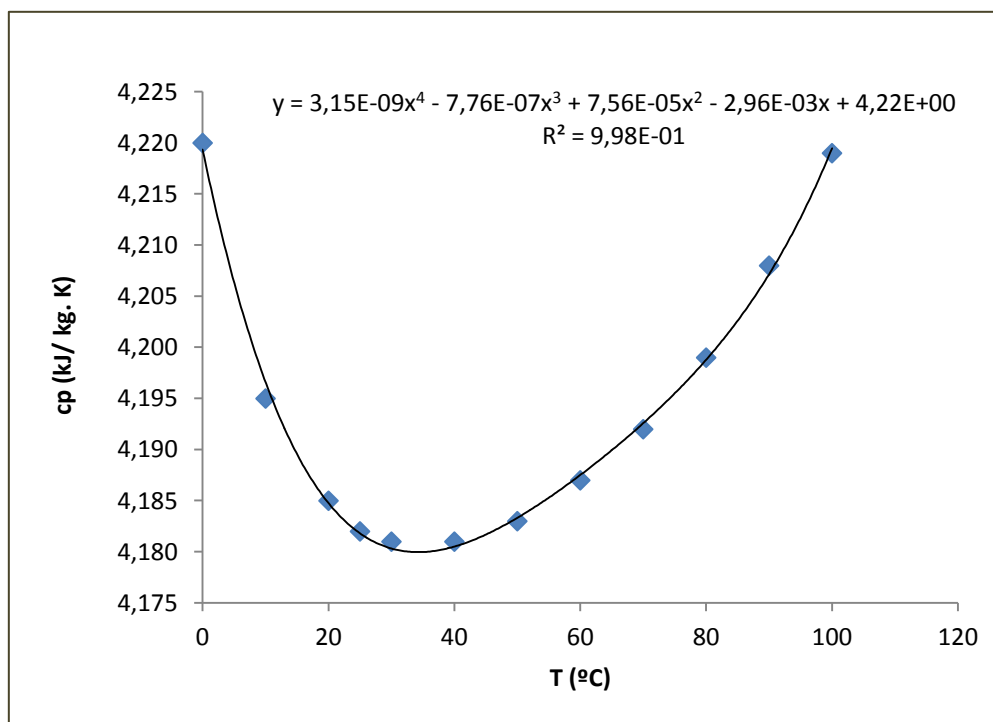


Figura A.2- Representação gráfica da capacidade calorífica versus temperatura para a água líquida

Anexo B - Exemplos de cálculo

B.1. Conversão de energia elétrica e de gás natural para tep

Exemplo de cálculo para o mês de janeiro.

A conversão de energia elétrica em tep foi feita sabendo o valor de energia elétrica em kWh na ZELL e o respetivo fator de conversão (tabela 3.2).

$$E_{e,jan} = 160944 \times 0,000215 = 34,6 \text{ tep}$$

A conversão da quantidade de gás natural em tep foi feita com o valor da massa volúmica e o fator de conversão (tabela 3.2).

$$E_{g,jan} = 86803 \times 0,8141 = 70666 \text{ kg} = 70,666 \times 1,077 = 76,1 \text{ tep}$$

B.2. Cálculo do caudal volumétrico e mássico do ar nos queimadores

Exemplo de cálculo para determinar o caudal volumétrico do ar nos queimadores

Exemplo de cálculo para o queimador A da estufa 1.

Para determinar o caudal volumétrico do ar no queimador A da estufa 1 multiplicou-se o valor da velocidade nessa estufa (tabela 3.8) pela área da grelha.

$$\dot{V}_q = 28,4 \times 0,0169 = 0,480 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para o outro tipo de queimador apresentado o cálculo é o mesmo.

Exemplo de cálculo para determinar o caudal mássico do ar nos queimadores

Multiplicando o caudal volumétrico, calculado de acordo com o anexo A, pela massa específica do ar a 24°C obteve-se o caudal mássico do ar no queimador A da estufa 1.

$$\dot{m}_q = 0,480 \times 1,186 = 0,569 \text{ kg/s}$$

B.3. Cálculo do caudal mássico dos gases de combustão

Exemplo de cálculo para determinar o caudal mássico dos gases de combustão

Exemplo de cálculo para os gases de combustão que saem pela chaminé 1.

Para determinar a massa volúmica dos gases na chaminé 1 foi necessário usar os valores da pressão, massa molecular e temperatura dos gases indicados na tabela 3.14 e fazer:

$$\rho = \frac{101800 \times 28,2}{8314 \times 415} = 0,832 \text{ kg/m}^3$$

Aplicando a equação 3.5 determinou-se o caudal mássico dos gases de combustão na chaminé 1.

$$\dot{m}_g = 4,0 \times 0,7088 \times 0,832 = 2,36 \text{ kg/s}$$

B.4. Cálculo da entalpia específica dos gases

Exemplo de cálculo para o componente O₂ presente nos gases de combustão da chaminé 1.

Primeiramente foi necessário conhecer os valores das constantes necessárias à aplicação da equação 4.8 (tabela 4.1) e a fração molar do componente (tabela 4.2). A temperatura dos gases na chaminé é 415K (tabela 3.14). Para determinar a entalpia específica do componente O₂ fez-se:

$$\begin{aligned} \int_{298}^T c_p \partial T &= 6,085 (415 - 298) + \frac{0,3631E - 2}{2} (415^2 - 298^2) + \frac{-0,1709E - 5}{3} (415^3 - 298^3) \\ &= 837,76 \text{ cal/mol} \end{aligned}$$

$$\int_{298}^T c_{p_i} \partial T \times \frac{4,18J}{1 \text{ cal}} \times y_i = 837,76 \frac{\text{cal}}{\text{mol}} \times \frac{4,18J}{1 \text{ cal}} \times 0,193 = 675,85 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}$$

B.5. Cálculo da entalpia específica do ar

Exemplo de cálculo para o ar de combustão

Primeiramente foi necessário conhecer os valores das constantes necessárias à aplicação da equação 4.8 (tabela 4.6). A temperatura do ar de combustão é de 24°C. Para determinar a entalpia específica do ar fez-se:

$$\begin{aligned} \int_{298}^T c_p \partial T &= 6,713 (297 - 298) + \frac{0,04697E - 2}{2} (297^2 - 298^2) + \frac{0,1147E - 5}{3} (297^3 - 298^3) \\ &= -6,95 \text{ cal/mol} \end{aligned}$$

$$\int_{298}^T c_{p_i} \partial T \times \frac{4,18J}{1 \text{ cal}} \times \frac{1}{MM_{ar}} = -6,95 \frac{\text{cal}}{\text{mol}} \times \frac{4,18J}{1 \text{ cal}} \times \frac{1}{28,9} = -1,01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

B.6. Cálculos de otimização

Para calcular o novo caudal de gás natural foi necessário refazer o balanço de energia (equação 4.7) tendo agora como incógnita o caudal mássico de gás natural, e sabendo que a potência perdida na parte A da análise energética é 712 kW. Fez-se este cálculo para o ar fresco e o ar de combustão impondo várias temperaturas de entrada e sabendo os valores das potências das correntes de entrada e saída da parte A do balanço de energia que constam na tabela 4.7.

B.6.1. Pré-aquecimento do ar fresco

Exemplo de cálculo para determinar o novo caudal de gás natural a 30°C

A entalpia específica do ar a 30°C calculou-se através da equação 4.9 e com os valores da tabela 4.6. O valor obtido foi de 34,79 cal/mol ou 5,03 kJ/kg, tendo em conta a massa molar do ar de 28,9 kg/kmol.

A potência térmica do ar fresco foi determinada pela equação 4.14. Somando as potências térmicas das correntes de entrada da parte A do balanço, admitindo agora a nova potência térmica do ar fresco determinou-se o valor da potência térmica correspondente às correntes de entrada.

Sabendo que $\sum H_s = 1546,5 \text{ kW}$ e que o $PCI=639,6 \text{ kWmin/m}^3$, determinou-se o novo caudal de gás natural estando o ar a uma temperatura de 30°C.

$$q = \sum H_s + \dot{m}_{gás} \times PCI - \sum H_e \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \dot{m}_{gás} = \frac{q - \sum H_s + \sum H_e}{PCI} = \frac{-712 - 1546,5 + 92,92}{-639,6} = 3,39 \text{ m}^3/\text{min}$$

Os valores obtidos para o caudal de gás natural assim como o valor determinado para a corrente de ar fresco total foi calculada considerando o caudal mássico do ar fresco de 19,21 kg/s. Este caudal de ar fresco correspondente à soma dos caudais mássicos das estufas 1 a 4, na tabela 3.11, quer para a entrada quer para a saída da tela.

Na tabela B.1 encontram-se os valores calculados do caudal de gás natural consumido, da entalpia específica do ar fresco e da entalpia total das correntes de entrada.

Tabela B.1 – Valores do caudal de gás natural consumido e entalpia específica do ar fresco e entalpia total das correntes de entrada

T (°C)	$\int_{298}^T cp \, dT$ (cal/mol)	$\int_{298}^T cp \, dT \times \frac{4,18 J}{1 cal} \times \frac{kmol}{28,9 kg}$ (kJ/kg)	H _{ar fresco} (kW)	ΣH_e (kW)	$m_{gás\ novo}$ (m ³ /min)
30	34,79	5,03	96,66	92,92	3,39
35	69,61	10,07	193,40	189,66	3,23
40	104,45	15,11	290,22	286,48	3,08
45	139,33	20,15	387,13	383,39	2,93
50	174,24	25,20	484,11	480,37	2,78

À medida que a temperatura imposta aumenta o caudal de gás consumido diminui tal como se pode verificar pela observação da tabela B.1.

B.6.2. Pré-aquecimento do ar de combustão

Na tabela B.2 encontram-se representados os valores obtidos para o caudal de gás natural assim como o valor determinado para a corrente de ar de combustão, com indicação da entalpia específica do ar de combustão e da entalpia total das correntes de entrada.

Tabela B.2 – Valores do caudal de gás natural consumido e entalpia específica do ar de combustão e entalpia total das correntes de entrada

T (°C)	$\int_{298}^T cp \, dT$ (cal/mol)	$\int_{298}^T cp \, dT \times \frac{4,18 J}{1 cal} \times \frac{kmol}{28,9 kg}$ (kJ/kg)	H _{ar combustão} (kW)	ΣH_e (kW)	$m_{gás\ novo}$ (m ³ /min)
30	34,79	5,03	15,35	-32,19	3,58
35	69,61	10,07	30,71	-16,83	3,56
40	104,45	15,11	46,08	-1,46	3,53
45	139,33	20,15	61,46	13,93	3,51
50	174,24	25,20	76,86	29,32	3,49

O caudal de gás natural consumido diminui com o aumento da temperatura imposta mas de uma forma menos acentuada. O cálculo do caudal de gás natural relativo ao ar de combustão foi efetuado seguindo os mesmos procedimentos que para o ar fresco, usando agora o caudal mássico de ar de combustão de 3,05 kg/s.

B.6.3. Cálculo poupança anual de gás natural

Para cada temperatura imposta foi determinada a diferença entre o caudal novo de gás natural e o caudal atual (3,61 m³/min). Sabendo a diferença do consumo de gás e que o custo de gás natural calculado à custa das faturas energéticas fornecidas pela empresa é de 0,575 €/m³ e que a máquina trabalha 8447 h/ano determinou-se a poupança anual de gás natural para o ar fresco e para o ar de combustão. Os valores obtidos constam na tabela B.3.

Tabela B.3 – Valores da poupança anual de gás natural para cada temperatura imposta ao ar fresco e ao ar de combustão

T (°C)	Poupança (€/ano)	
	Ar fresco	Ar de combustão
30	64.113	8.743
35	110.740	14.571
40	154.453	23.314
45	198.167	29.142
50	241.880	34.971

B.7. Cálculo da potência transferida pelos fluidos no permutador

O calor transferido pelo fluido frio foi determinado fazendo:

$$q_f = \dot{m}_f \times c_{p_f} \times (T_{fs} - T_{fe})$$

Exemplo de cálculo da determinação da potência térmica do fluido frio – ar fresco para o caso 1 – A

O caso 1 utiliza o caudal total de ar fresco que entra nas estufas 1 a 4, e que é de 19,21 kg/s (tabela 3.11). O calor específico do ar foi determinado recorrendo às propriedades físicas do ar – Anexo A e, sabendo que $T_{fe} = 23$ °C e $T_{fs} = 40$ °C. Então:

$$c_p = 1,0050 \text{ kJ/(kg. K)}$$

$$q_f = 19,21 \times 1,0050 \times (40 - 23) = 328 \text{ kW}$$

Anexo C – Valores medidos do volume de gás natural

O volume de gás natural para os vários artigos em poliéster foi lido ao longo de vários ensaios.

Na tabela C.1 apresentam-se os valores do volume de gás natural lidos no contador assim como o valor médio do caudal volumétrico de gás natural para o artigo P1.

Tabela C.1 - Volume de gás natural consumido em cada estufa e respetivo caudal volumétrico para o artigo P1

Tempo (min)	Ensaio 1				Ensaio 2			Caudal volumétrico (m ³ /min)					Caudal médio gás (m ³ /min)
	0	26	22	99	0	17	15						
ESTUFA	Volume de gás (m ³)				Volume de gás (m ³)								
1A	9160,6	9170,1	9178,8	9218,2	16994,7	17001,7	17008,2	0,3654	0,3955	0,3980	0,4118	0,4333	0,4008
1B	9291,9	9301,8	9310,9	9352,2	17072,3	17078,8	17084,7	0,3808	0,4136	0,4172	0,3824	0,3933	0,3975
2	7636,0	7644,4	7652,2	7687,3	14366,7	14372,5	14377,8	0,3231	0,3545	0,3545	0,3412	0,3533	0,3453
3	33195,0	33212,2	33227,8	33298,1	47469,5	47481,1	47491,7	0,6615	0,7091	0,7101	0,6824	0,7067	0,6939
4	9743,5	9751,5	9759,2	9792,7	16769,7	16775,3	16780,5	0,3077	0,3500	0,3384	0,3294	0,3467	0,3344
5	20830,9	20841,0	20850,2	20890,9	26806,9	26813,8	26820,2	0,3885	0,4182	0,4111	0,4059	0,4267	0,4101
6	8100,3	8114,2	8127,0	8184,2	15155,7	15165,1	15173,9	0,5346	0,5818	0,5778	0,5529	0,5867	0,5668
7	6440,9	6450,2	6458,7	6496,4	12385,5	12391,9	12397,9	0,3577	0,3864	0,3808	0,3765	0,4000	0,3803
Caudal volumétrico médio total (m ³ /min)													3,53

Na tabela C.2 apresentam-se os valores do volume de gás natural lidos no contador e na tabela C.3 o valor médio do caudal volumétrico de gás natural para o artigo P2.

Tabela C.2 - Volume de gás natural consumido em cada estufa para o artigo P2

Tempo (min)	Ensaio 1				Ensaio 2			Ensaio 3				
	0	24	21	79	0	20	17	0	20	19	17	16
ESTUFA	Volume de gás (m ³)				Volume de gás (m ³)			Volume de gás (m ³)				
1A	9270,8	9281,7	9290,2	9321,1	12527	12535	12541,3	14534,7	14541,6	14549,7	14556,2	14562,7
1B	9407,2	9418,5	9427,3	9459,5	12680	12687,6	12694,1	14692,7	14699,6	14707,9	14714,6	14721,2
2	7738	7748,8	7757,2	7787,9	10545	10552,1	10558,4	12203,6	12210,4	12218,5	12224,9	12231,3
3	33390	33409	33424	33478	39365	39378,5	39389,5	42994,4	43006,5	43020,9	43032,3	43043,7
4	9834,9	9843,6	9850,3	9875,1	12734	12741,1	12746,4	14613,6	14619,1	14625,7	14631,1	14636,4
5	20948	20961	20970,5	21005	23507	23515,3	23522,3	24915,2	24922,8	24931,8	24938,9	24946,0
6	8259,5	8275	8287,1	8331,2	11234	11244,8	11253,9	12883,8	12893,6	12905,2	12914,4	12923,7
7	6544,1	6554,1	6561,1	6589,3	8988,3	8990,8	9001,5	10454,7	10461,0	10468,5	10474,3	10480,2

Tabela C.3 - Caudal volumétrico em cada estufa para o artigo P2

ESTUFA	Caudal volumétrico (m ³ /min)									Caudal médio gás (m ³ /min)
1A	0,4542	0,4048	0,3911	0,3800	0,3706	0,3450	0,4263	0,3824	0,4063	0,3956
1B	0,4708	0,4190	0,4076	0,3850	0,3824	0,3450	0,4368	0,3941	0,4125	0,4059
2	0,4500	0,4000	0,3886	0,3700	0,3706	0,3400	0,4263	0,3765	0,4000	0,3913
3	0,7958	0,7000	0,6835	0,6850	0,6471	0,6050	0,7579	0,6706	0,7125	0,6953
4	0,3625	0,3190	0,3139	0,3350	0,3118	0,2750	0,3474	0,3176	0,3312	0,3237
5	0,5500	0,4429	0,4392	0,4250	0,4118	0,3800	0,4737	0,4176	0,4437	0,4427
6	0,6458	0,5762	0,5582	0,5550	0,5353	0,4900	0,6105	0,5412	0,5813	0,5659
7	0,4167	0,3333	0,3570	0,1250	0,6294	0,3150	0,3947	0,3412	0,3688	0,3646
Caudal volumétrico médio total (m ³ /min)										3,59

Na tabela C.4 apresentam-se os valores do volume de gás natural lidos para o artigo P3 assim como o valor médio do caudal volumétrico de gás natural.

Tabela C.4 - Volume de gás natural consumido em cada estufa e respetivo caudal volumétrico para o artigo P3

Tempo (min)	0	18	52	22	Caudal volumétrico (m ³ /min)			Caudal médio gás (m ³ /min)
ESTUFA	Volume de gás (m ³)							
1A	12399,2	12405,6	12425,3	12433,6	0,3556	0,3788	0,3773	0,3706
1B	12554,3	12561,8	12572,8	12581,7	0,4167	0,2115	0,4045	0,3443
2	10427,8	10433,3	10450,1	10457,1	0,3056	0,3231	0,3182	0,3156
3	39137,5	39149,0	39184,2	39199,0	0,6389	0,6769	0,6727	0,6628
4	12621,8	12627,7	12645,2	12652,7	0,3278	0,3365	0,3409	0,3351
5	23372,7	23379,3	23399,7	23408,3	0,3667	0,3923	0,3909	0,3833
6	11047,5	11056,9	11085,8	11097,8	0,5222	0,5558	0,5455	0,5411
7	8860,5	8867,1	8887,3	8895,8	0,3667	0,3885	0,3864	0,3805
Caudal volumétrico médio total (m ³ /min)								3,33

Na tabela C.5 apresentam-se os valores do volume de gás natural lidos para o artigo P4 assim como o valor médio do caudal volumétrico de gás natural.

Tabela C.5- Volume de gás natural consumido em cada estufa e respetivo caudal volumétrico para o artigo P4

Tempo (min)	0	16	19	14	Caudal volumétrico (m ³ /min)			Caudal médio gás (m ³ /min)
ESTUFA	Volume de gás (m ³)							
1A	15834,0	15840,3	15847,6	15853,5	0,3937	0,3842	0,4214	0,3998
1B	15987,5	15993,5	16000,5	16006,0	0,3750	0,3684	0,3929	0,3788
2	13264,4	13270,5	13277,5	13283,1	0,3813	0,3684	0,4000	0,3832
3	45533,5	45544,4	45556,8	45566,8	0,6813	0,6526	0,7143	0,6827
4	15966,6	15971,7	15977,7	15982,2	0,3188	0,3158	0,3214	0,3187
5	26128,1	26134,3	26141,4	26147,1	0,3875	0,3737	0,4071	0,3894
6	14229,6	14238,4	14248,7	14256,7	0,5500	0,5421	0,5714	0,5545
7	11378,7	11384,7	11391,6	11397,0	0,3750	0,3632	0,3857	0,3746
Caudal volumétrico médio total (m ³ /min)								3,48

Na tabela C.6 apresentam-se os valores do volume de gás natural lidos para o artigo P5 assim como o valor médio do caudal volumétrico de gás natural.

Tabela C.6- Volume de gás natural consumido em cada estufa e respetivo caudal volumétrico para o artigo P5

Tempo (min)	0	17	14	16	Caudal volumétrico (m ³ /min)			Caudal médio gás (m ³ /min)
ESTUFA	Volume de gás (m ³)							
1A	14583,5	14589,5	14595,3	14601,6	0,3529	0,4143	0,3938	0,3870
1B	14742,4	14748,5	14754,4	14760,7	0,3588	0,4214	0,3938	0,3913
2	12251,8	12258,1	12264,2	12270,7	0,3706	0,4357	0,4063	0,4042
3	43079,7	43089,9	43099,9	43110,5	0,6000	0,7143	0,6625	0,6589
4	14652,9	14657,7	14662,3	14667,2	0,2824	0,3286	0,3063	0,3057
5	24968,7	24974,9	24981,0	24987,4	0,3647	0,4357	0,4000	0,4001
6	12952,9	12961,2	12969,2	12977,8	0,4882	0,5714	0,5375	0,5324
7	10498,6	10504,0	10509,2	10514,7	0,3176	0,3714	0,3438	0,3443
Caudal volumétrico médio total (m ³ /min)								3,42

Na tabela C.7 apresentam-se os valores do volume de gás natural lidos para o artigo P6 assim como o valor médio do caudal volumétrico de gás natural.

Tabela C.7- Volume de gás natural consumido em cada estufa e respetivo caudal volumétrico para o artigo P6

Tempo (min)	0	20	18	17	16	Caudal volumétrico (m ³ /min)				Caudal médio gás (m ³ /min)
ESTUFA	Volume de gás (m ³)									
1A	15780,9	15788,6	15795,3	15802,2	15808,6	0,3850	0,3722	0,4059	0,4000	0,3908
1B	15936,5	15943,9	15950,3	15957,0	15963,1	0,3700	0,3556	0,3941	0,3813	0,3752
2	13202,9	13212,1	13220,0	13228,2	13235,9	0,4600	0,4389	0,4824	0,4812	0,4656
3	45437,8	45451,8	45463,4	45476,5	45488,2	0,7000	0,6444	0,7706	0,7312	0,7116
4	15921,3	15927,7	15932,9	15938,6	15944,0	0,3200	0,2889	0,3353	0,3375	0,3204
5	26068,7	26077,5	26085,2	26093,1	26100,4	0,4400	0,4278	0,4647	0,4563	0,4472
6	14149,1	14160,7	14170,7	14180,9	14191,0	0,5800	0,5556	0,6000	0,6313	0,5917
7	11324,8	11332,3	11338,5	11345,0	11352,1	0,3750	0,3444	0,3824	0,4438	0,3864
Caudal volumétrico médio total (m ³ /min)										3,69

Na tabela C.8 apresentam-se os valores do volume de gás natural lidos para o artigo P7 assim como o valor médio do caudal volumétrico de gás natural.

Tabela C.8- Volume de gás natural consumido em cada estufa e respetivo caudal volumétrico para o artigo P7

Tempo (min)	0	18	16	148	17	16	Caudal volumétrico (m³/min)					Caudal médio gás (m³/min)
ESTUFA	Volume de gás (m³)											
1A	17040,7	17047,7	17054,4	17116,1	17122,7	17129,6	0,3889	0,4188	0,4169	0,3882	0,4312	0,4088
1B	17113,3	17119,3	17125,0	17177,8	17183,4	17189,4	0,3333	0,3563	0,3568	0,3294	0,3750	0,3502
2	14403,2	14408,3	14413,2	14458,8	14463,7	14468,8	0,2833	0,3063	0,3081	0,2882	0,3187	0,3009
3	47542,9	47553,6	47563,9	47659,7	47670,0	47680,8	0,5944	0,6438	0,6473	0,6059	0,6750	0,6333
4	16806,8	16812,2	16817,6	16867,1	16872,4	16877,8	0,3000	0,3375	0,3345	0,3118	0,3375	0,3242
5	26850,0	26856,1	26861,8	26916,4	26922,1	26928,3	0,3389	0,3563	0,3689	0,3353	0,3875	0,3574
6	15216,4	15225,2	15233,6	15312,4	15320,6	15329,6	0,4889	0,5250	0,5324	0,4824	0,5625	0,5182
7	12427,4	12433,5	12439,5	12495,5	12501,4	12507,7	0,3389	0,3750	0,3784	0,3471	0,3938	0,3666
Caudal volumétrico médio total (m³/min)												3,26